

**Estudio de Prefactibilidad de Concreto Sostenible usando agregado grueso  
reciclado en Barranquilla.**

**Anyeliz Yulieth Castillo Zea<sup>1</sup>**

**Alejandra Lucía Chimá Acosta<sup>2</sup>**

**Gonzalo Alberto Rondón Rueda<sup>2</sup>**

**Universidad de la Costa, CUC**

**Facultad de Ingeniería**

**Programas de Ingeniería Industrial<sup>1</sup> & Civil<sup>2</sup>**

**Barranquilla**

**2019**

**Estudio de Prefactibilidad de Concreto Sostenible usando agregado grueso  
reciclado en Barranquilla.**

**Anyeliz Castillo Zea<sup>1</sup>, Alejandra Chimá Acosta<sup>2</sup> y Gonzalo Rondón Rueda<sup>2</sup>**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial<sup>1</sup> e Ingeniero Civil<sup>2</sup>**

**Tutor: Ing. Andrés Guarín García, Mag.**

**Cotutor: Ing. Fabricio Di Paoli, M.sc.**

**Universidad de la Costa, CUC**

**Facultad de Ingeniería**

**Programas de Ingeniería Industrial<sup>1</sup> & Civil<sup>2</sup>**

**Barranquilla**

**2019**

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente de Jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

Barranquilla, \_\_\_\_\_ 2019

### **Dedicatoria**

*“Porque todas las cosas proceden por Él y para Él ¡A Él sea la gloria por siempre! Amén.” Rom. 11:36.*

A Dios, pues siempre tiene planes mejores que los nuestros. A mi familia, por su apoyo día y noche. A mis mejores amigos, ella que pasó cada minuto sufriendo conmigo pues hace parte de mi equipo y él estuvo siempre en mi corazón demostrándome que sí él pudo también yo.

*Anyeliz Castillo Zea.*

A Dios, a mis Padres (en especial a mi Mamá) por confiar en mí a pesar de todo, mi Abuela por su apoyo incondicional, Isabella por soportar la luz de cada traspasada, a Nidia por cuidar de mí, a toda mi familia y amigos que de alguna manera se alegran por este logro.

*Alejandra Chimá Acosta.*

A Dios por permitirme estar en el lugar y momento indicado, por guiarme y mostrarme el camino que debo seguir; a mis Padres por siempre brindarme cariño, por apoyarme y ser ese soporte emocional en mis momentos difíciles y celebrar las victorias a lo largo de este camino.

*Gonzalo Rondón Rueda.*

### **Agradecimientos**

Agradecemos la disposición y ayuda brindada por parte de la ingeniera Carmén Rodríguez de Cantera Munarriz, a los ingenieros Roberto Lewis y Andrés Lewis de la constructora ALB y al Gilberto Martínez de la Universidad del Norte por permitirnos usar sus respectivas maquinarias de trituración y facilitarnos esa operación fundamental de nuestra investigación.

A nuestros tutores los ing. Fabricio Di Paoli y Andrés Guarín por ser nuestras guías y ayudarnos en cualquier momento que los necesitáramos. También, agradecemos a la ing. Marly Redondo, a los laboratoristas Silvia, Enoi, Habid y William y al personal de mantenimiento, en especial al señor Raúl, por todo el apoyo brindado durante toda la etapa experimental.

Además, a Nancy Martínez por todas las veces que nos facilitó su medio de transporte para nuestras diligencias y a Elsy Rondón por todo el apoyo en los momentos que más se necesitó.

Y para finalizar, de todo corazón le damos gracias a Stiven Angulo, Adriana Donado, Katherine Quintero, Marcela Gamarra, Kevin Arrieta, Wilson Rúa, Juan Acuña, Fernanda Agamez, Jesús Remolina, Kevin Gómez, Steven Restrepo, Jaime Jiménez, Sebastián Torres, Rubén Noguera, Lina Ramírez y Madinson Echeverría, a todos ustedes gracias por ayudarnos de alguna u otra forma en cualquier actividad o momento que los necesitábamos, gracias sinceramente.

### Nomenclaturas

RCD: Residuo de construcción y demolición.

AFN: Agregado fino natural.

AGN: Agregado grueso natural.

AGR: Agregado grueso reciclado.

AR: Agregado Reciclado.

TME: Técnica de mejoramiento experimental.

$f'_c$ : Resistencia especificada a la compresión simple del concreto.

AGR con TME: Agregado grueso reciclado con la técnica de mejoramiento experimental.

AGR 10%: Remplazo del 10% en volumen del AGN por el AGR.

AGR 50%: Remplazo del 50% en volumen del AGN por el AGR.

AGR 50% TME: Remplazo del 50% en volumen del AGN por el AGR TME.

RC: Residuo de concreto.

TM: Tamaño nominal.

TMN: Tamaño muestra nominal.

$M_C$ : Masa unitaria compactada.

D.N: Densidad nominal.

D.A: Densidad aparente.

D.S.S.S: Densidad saturada superficialmente seca.

NTC: Norma técnica colombiana.

MF: Modulo de finura.

a/c: relación agua cemento.

## Resumen

En el presente estudio se evalúa la prefactibilidad del concreto sostenible usando agregado grueso reciclado procedente de un pavimento rígido de Barranquilla, para lo cual se desarrollaron 3 etapas. Primero, estudio de mercado que comprende un diagnóstico mediante encuestas y entrevistas aplicadas a un grupo de obras civiles seleccionadas y a algunas de las entidades involucradas en la gestión de los residuos de la ciudad, el cual se complementa con un mapeo geográfico que permite conocer el nivel de concentración de los RCDs encontrados de acuerdo un ruteo establecido por localidades. Segundo, viabilidad técnica conformada por una caracterización inicial de los materiales a utilizar, la aplicación de una técnica de mejoramiento experimental (TME) y, el diseño y elaboración de 4 tipos de mezclas definidos según el porcentaje de reemplazo de AGN por el AGR en volúmenes de 0%, 10%, 50% sin TME y 50% con TME para la fabricación de 24 especímenes cilíndricos ensayados a compresión a la edad de 28 días. Tercero, evaluación económica mediante el análisis de costos unitarios del concreto sostenible versus un concreto convencional. Al finalizar este estudio se determina si el concreto sostenible propuesto en la investigación es viable según los parámetros estudiados y las normativas colombianas vigentes.

***Palabras clave:*** concreto sostenible, estudio de prefactibilidad, agregado reciclado de concreto, residuos de construcción y demolición, técnica de mejoramiento experimental

### **Abstract**

In this study, the prefeasibility of sustainable concrete is evaluated using a coarse recycled aggregate from a rigid pavement in Barranquilla, for this purpose three stages were developed. First, a market study that includes a diagnosis made through surveys and interviews targeted at a group of selected civil works and at some of the entities involved in the management of waste in the city, the diagnosis is complemented with a geographic mapping that allows to know the concentration level of the RCDs found according to a route established by localities. Second, technical feasibility consisting of an initial characterization of the materials to be used, the application of an experimental improvement technique (TME) and, the design and development of 4 types of mixtures defined by the percentage of AGN replaced with the AGR in volumes of 0%, 10%, 50% without TME and 50% with TMEs for the manufacturing of 24 cylindrical specimens tested for compression at the age of 28 days. Third, economic assessment through unit cost analysis of sustainable concrete versus conventional concrete. At the end of this study it is determined whether the sustainable concrete proposed in the research is feasible according to the studied parameters and the existing Colombian regulations.

**Keywords:** sustainable concrete, prefeasibility study, recycled concrete aggregate, construction and demolition waste, experimental improvement technique



## Contenido

Lista de tablas y figuras.....	12
Introducción .....	17
Capítulo 1 Descripción general del proyecto .....	18
Planteamiento del problema .....	18
Justificación.....	20
Objetivos .....	21
Objetivo general. ....	21
Objetivos específicos.....	21
Capítulo 2 Marco referencial.....	22
Marco conceptual .....	22
El concreto.....	22
Residuos de construcción y demolición (RCD). ....	24
Estudio de prefactibilidad.....	29
Marco Teórico .....	31
Diseño de mezcla: método de la A.C.I 211.....	31
Economía circular. ....	33
Desarrollo sostenible. ....	34
Marco Legal .....	36

Marco técnico .....	38
Propiedades físicas y mecánica de los agregados. ....	38
Propiedades físicas del concreto en estado fresco.....	39
Capítulo 3 Estado del arte .....	41
Capítulo 4 Metodología.....	46
Diseño Metodológico .....	46
Desarrollo Metodológico.....	48
Diagnóstico general de la gestión.....	48
Viabilidad técnica.....	50
Evaluación económica.....	59
Capítulo 5 Resultado y análisis .....	59
Diagnostico general de la gestión de los RCD en Barranquilla .....	59
Legalmente ¿Qué debería hacerse? .....	59
¿Cómo se están gestionando los RCD actualmente? .....	62
Estudio de Mercado.....	75
Viabilidad técnica.....	82
Propiedades de los agregados utilizados. ....	83
Diseño de mezclas.....	97
Resistencia a la compresión. ....	101
Evaluación Económica.....	106

Análisis de costos .....	106
Comparación con concreto convencional .....	111
Conclusiones y recomendaciones.....	112
Referencias .....	115
Apéndice.....	120

**Lista de tablas y figuras**

Tabla 1. Clasificación de los RCD en Bogotá. ....	26
Tabla 2. Etapas de la metodología de la investigación. ....	46
Tabla 3. Ensayos de Agregados según las NTC 174. ....	53
Tabla 4. Ensayos para el concreto en estado fresco y endurecido. ....	58
Tabla 5. Listado de gestores registrados ante la C.R.A. ....	73
Tabla 6. Recopilación de RCD encontrados en los recorridos realizados según las localidades. ....	79
Tabla 7. Granulometría del agregado reciclado a partir del residuo de concreto. ....	85
Tabla 8. Granulometría del agregado grueso natural. ....	87
Tabla 9. Granulometría del agregado fino natural. ....	88
Tabla 10. Granulometría del AGR con técnica de mejoramiento experimental. ....	90
Tabla 11. Resumen de la caracterización físico-mecánica de los agregados. ....	96
Tabla 12. Datos para la dosificación teórica de concreto. ....	97
Tabla 13. Dosificación teórica de las mezclas propuestas. ....	99
Tabla 14. Dosificación definitiva con ajustes. ....	100
Tabla 15. Registro de la resistencia a la compresión 28 días. ....	101
Tabla 16. Resistencias a la compresión promedios. ....	102
Tabla 17. Comparación literaria de los resultados de compresión. ....	105
Tabla 18. Costos de la trituración del concreto reciclado. ....	107
Tabla 19. Precios promedio de cada material. ....	108
Tabla 20. Dosificación definitiva con ajustes. ....	108
Tabla 21. Relación masa y volumen de los agregados. ....	109
Tabla 22. Costos totales de materia prima. ....	109

Tabla 23. Costos operativos para fabricar 1m <sup>3</sup> de concreto.....	110
Tabla 24. Costos finales para 1m <sup>3</sup> de concreto. ....	110
<i>Figura 1.</i> Polvo de cemento. Fuente: mssingenieros.com	23
<i>Figura 2.</i> Agregado grueso natural (izquierda). Agregado fino natural (derecha). Fuente propia. .....	24
<i>Figura 3.</i> RCDs en distintos puntos de Barranquilla. Fuente: propia.....	25
<i>Figura 4.</i> Representación gráfica de las etapas de un estudio de prefactibilidad. Elaboración propia. Fuente: (Leonardo Solarte Pazos, 2001).....	30
<i>Figura 5.</i> Procedimiento de diseño de mezcla. Elaboración propia. Fuente: libro de tecnología del concreto y mortero de (Sánchez De Guzmán, 1996). ....	32
<i>Figura 6.</i> Representación gráfica de desarrollo sostenible. Elaboración propia. Fuente:(Organización de Naciones Unidas, 2015) .....	34
<i>Figura 7.</i> Alternativas para el manejo de RCD. Elaboración propia. Fuente: (Carcamo, 2008)..	36
<i>Figura 8.</i> Resumen cronológico de las normativas relacionadas con la gestión integral de los RCD en Barranquilla. Elaboración propia. Fuente: Resolución 1482 del 2017 (Barranquilla Verde, 2017). ....	37
<i>Figura 9.</i> Máquina del ensayo de compresión utilizada. Fuente propia. ....	40
<i>Figura 10.</i> Representación gráfica de los criterios para la aplicación de encuestas. Elaboración propia. Adaptado de (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015).....	49
<i>Figura 11.</i> Fragmentos iniciales del residuo de concreto. Fuente propia. ....	51
<i>Figura 12.</i> Planta de trituración de la cantera Munarriz, ubicada en Puerto Colombia, Atlántico. Fuente propia. ....	52
<i>Figura 13.</i> Separación del AR por tamaños máximos de partículas. Fuente propia. ....	52

*Figura 14.* Trituradora de mandíbula móvil de la constructora ALB Ingeniería & Construcción.

Fuente propia. .... 53

*Figura 15.* Tamizadora mecánica utilizada para realizar la granulometría del agregado reciclado.

Fuente propia. .... 54

*Figura 16.* Representación de la Técnica de mejoramiento experimental aplicada, Pulido (a) y

lavado (b). Fuente propia. .... 55

*Figura 17.* Equipo utilizado para realizar las mezclas. Fuente propia..... 57

*Figura 18.* Elaboración de probetas cilíndricas para ensayo de compresión. Fuente: propia. .... 58

*Figura 19.* Participación de cada uno de los entes involucrados en la gestión de los RCD en

Barranquilla. Elaboración propia. Fuente: (Barranquilla Verde, 2017)..... 61

*Figura 20.* Representación gráfica de los entes involucrados en la gestión de RCD en

Barranquilla. Elaboración propia. .... 62

*Figura 21.* Dominio de concepto de RCD. Fuente propia. .... 63

*Figura 22.* Conocimiento de las legislaciones vigentes relacionadas con los RCD. Fuente propia.

..... 64

*Figura 23.* Conocimiento de las legislaciones vigentes relacionadas con los RCD. Fuente propia.

..... 64

*Figura 24.* Clasificación general de los RCD encontrados. Fuente propia. .... 66

*Figura 25.* Etapas Constructivas de las obras encuestadas. Fuente propia..... 66

*Figura 26.* Cantidad de RCD que se generan mensualmente en excavación, construcción y

acabado. Fuente propia. .... 67

*Figura 27.* Flujograma del proceso actual productor de RCD. Elaboración propia. .... 68

*Figura 28* Generadores que separan los RCD in situ. Fuente propia. .... 69

<i>Figura 29.</i> Gestores más frecuentados por los generadores. Fuente propia. ....	70
<i>Figura 30.</i> Conocimiento de algún punto limpio o planta de aprovechamiento. Fuente propia. .	71
<i>Figura 31.</i> Estadísticas de licencias de construcción enero 2017–enero 2019. Fuente: DANE...	75
<i>Figura 32.</i> Representación gráfica de los RCD encontrados en Barranquilla. Elaboración propia. .....	81
<i>Figura 33.</i> Flujograma del proceso industrial realizado para obtener los AGR. Elaboración propia. ....	83
<i>Figura 34.</i> Cuarteo del agregado reciclado. Fuente propia. ....	84
<i>Figura 35.</i> Curva granulométrica del agregado grueso reciclado junto con los límites establecidos por la NTC 174.....	86
<i>Figura 36.</i> Curva granulométrica del agregado fino reciclado junto con los límites establecidos por la NTC 174. ....	86
<i>Figura 37.</i> Comparación de la curva granulométrica del AGN vs AGR y límites de gradación de la NTC 174.....	88
<i>Figura 38.</i> Comparación de la curva granulométrica del AFN vs AFR y límites de gradación de la NTC 174.....	89
<i>Figura 39.</i> Curva granulométrica AGR con técnica de mejoramiento experimental y límites de gradación de la NTC 174. ....	91
<i>Figura 40.</i> Comparación gráfica de la masa unitaria y % de vacíos entre los AGN – AGR y AGR con TME. ....	92
<i>Figura 41.</i> Densidades de los agregados gruesos analizados. Elaboración propia.....	93
<i>Figura 42.</i> Absorción de los agregados gruesos. Elaboración propia. ....	93
<i>Figura 43.</i> Humedad de los agregados gruesos. Elaboración propia. ....	94

<i>Figura 44.</i> Comparación visual del AGR con y sin técnica respectivamente. Fuente propia. ....	95
<i>Figura 45.</i> Resistencia promedio por tipo de mezcla. Elaboración propia.....	103
<i>Figura 46.</i> Densidades promedio por tipo de mezclas. Elaboración propia. ....	104
<i>Figura 47.</i> Precio de 1m <sup>3</sup> de concreto 2000 psi en el mercado. Fuente: construdata. ....	111
<i>Figura 48.</i> Botadero encontrado en la circunvalar con la entrada de los robles. Fuente propia.	113



## **Introducción**

El sector de la construcción se ha identificado como uno de los fuertes pilares del desarrollo económico y social de un país, forzado en gran medida por el crecimiento de la población.

A pesar de su importancia, esta industria demanda de manera excesiva el uso de recursos no renovables, es decir, materia prima; y lo que más preocupa es la generación de los residuos de construcción y construcción (RCD), comúnmente conocidos como los escombros, de una manera desmedida debido a las políticas regulatorias débiles que existen para el manejo y disposición final adecuado de estos, provocando así una problemática ambiental y urbanística en la ciudad.

Por otro lado, los restos de concreto son los desechos que lideran, con la mayor generación, la lista de residuos inertes de los RCD y presentan un porcentaje neto potencialmente aprovechable para su reutilización, razones justas por la que se ha identificado la necesidad de un estudio de prefactibilidad, para conocer la viabilidad técnica y económica del uso de agregado grueso reciclado como alternativa para la fabricación de concreto con medidas de sostenibilidad aceptables bajo las normativas colombianas.

## **Capítulo 1**

### **Descripción general del proyecto**

#### **Planteamiento del problema**

El aumento de las construcciones de obras civiles en nuestro país tiene sus ventajas y desventajas. Desde una perspectiva, promueve la generación de empleo y el desarrollo económico de una sociedad; sin embargo, al incrementar la cantidad de construcciones se propende a la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) o también conocido como escombros. Esencialmente se trata de residuos sólidos, constituidos por tierras y áridos combinados, restos de asfalto, concreto, piedras, ladrillos, plásticos, yesos, maderas y en general todos los desechos que se producen por todas las etapas constructivas de una obra, así como los generados por la reparación o demolición de infraestructuras obsoletas, correspondientes aproximadamente al 25% de los residuos del mundo (Mejía, Giraldo, & Martínez, 2013).

En Colombia, los escombros como son llamados habitualmente consisten cerca del 60% de la cantidad total de los residuos generados en las ciudades, los cuales aumentan con una tasa de tendencia del 4% anual (Chávez Porras, Palacio León, & Guarín Cortés, 2013). El impacto ambiental que provocan los RCD resulta significativo, puesto que la disposición incontrolada de estos en lugares inadecuados afecta directamente al entorno, degradando la calidad del paisaje, contribuyendo a la alteración de drenajes y áreas de suelo productivo, además de la pérdida de los recursos naturales (Mejía et al., 2013).

En Barranquilla no se cuenta con una escombrera distrital (Pacheco, Fuentes, Sánchez, & Rondón, 2017) y el desconocimiento de las normativas existentes que, además, no proponen un plan de gestión básico para la adecuada manipulación, tratamiento, control y disposición final de

los mismos, propenden a que estos residuos sean dispuestos en rellenos para todo tipo de desechos sólidos, multiplicando así las probabilidades de contaminación mediante lixiviados, sedimentos y emisiones atmosféricas generadas por su descomposición, donde la exposición a altas concentraciones de estos pueden causar a los seres humanos shock, convulsiones, dificultad para respirar, inconciencia, coma y hasta la muerte (Mejía et al., 2013). La consecuencia más preocupante es saber que se anula en su totalidad la posibilidad de reutilizar estos materiales potencialmente aprovechables para su reincorporación en un proceso productivo.

Es posible evidenciar lo anterior con la información presentada en el Plan de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS 2016 – 2027), que según el operador de servicios de aseo Triple A, para el año 2015 el distrito producía en promedio 236 ton de RCD por mes, de los cuales no se hace ningún tipo de aprovechamiento ni tampoco se cuenta con un estudio de caracterización de estos residuos generados en la ciudad (Alcaldía de Barranquilla, 2015)

De acuerdo con el expuesto encima surge la siguiente pregunta problema: ¿Es el residuo de concreto una alternativa factible como agregado reciclado en la producción de concreto sostenible?

**Justificación**

Tener conciencia del estado no renovable que tienen los agregados naturales, es una de las principales razones que promueve la búsqueda de nuevas alternativas para la fabricación del concreto. Asimismo, preocupa el aumento de los RCD y más aún su inadecuada disposición final, puesto que al ser depositados sin ningún tipo de separación previa y dejados a la intemperie, pueden producir sustancias nocivas afectando de manera negativa el medio ambiente debido a la contaminación química de los suelos, aguas superficiales y el aire, entre otros (Mejía et al., 2013).

Además, según el PGIRS, Barranquilla no cuenta con un plan gestor idóneo para estos residuos, ni estudios que permitan conocer la panorámica general de estos, desde la perspectiva de composición, cantidades de volúmenes o características fisicoquímico, evidenciando que en la ciudad se está perdiendo material potencialmente reutilizable, reciclable y valorizable, debido a que la literatura comprueba que a nivel mundial estos residuos son 100% aprovechables, bajo condiciones y procesos selectivos (Bedoya Montoya & Dzul López, 2015) y este hecho permite posicionar a los RCD, específicamente para este proyecto a los restos de concreto, como una alternativa rentable, puesto que al reutilizar estos desechos se eliminan gastos de disposición de estos y se reducen costos de materiales naturales.

Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio de prefactibilidad permite tener una propuesta sostenible para valorizar los restos de concreto a través de su transformación como agregados gruesos reciclados, por lo que esta alternativa muestra opciones de reducción de costos y rentabilidad, al ser una iniciativa sostenible.

## **Objetivos**

### **Objetivo general.**

Evaluar la prefactibilidad de la fabricación de concreto sostenible a partir del agregado grueso reciclado proveniente de los RCD de pavimento rígido de Barranquilla.

### **Objetivos específicos.**

- Identificar a través de una revisión literaria las tecnologías y tendencias involucradas en la reincorporación de los RCD como agregados en su proceso productivo.
- Documentar el estado actual de la gestión de los RCD a través de un diagnóstico para conocer el comportamiento del mercado.
- Comprobar la viabilidad técnica del uso de agregado grueso reciclado en la fabricación de concreto sostenible a partir un análisis comparativo entre las propiedades físico-mecánicas de los agregados utilizados y el diseño de las mezclas de concreto
- Evaluar económicamente los costos de las alternativas de concreto sostenibles resultantes en función de un concreto convencional comercial.
- Determinar la prefactibilidad del concreto sostenible a partir de los resultados d los parámetros técnicos, económicos y de mercado.

## Capítulo 2

### Marco referencial

En esta sección se encuentran los conceptos, teorías y normativas necesarias para lograr una mayor comprensión sobre la temática tratada en este trabajo; asimismo sirve como soporte a los argumentos, hipótesis y objetivos aquí presentados.

### Marco conceptual

#### **El concreto.**

Este material está compuesto principalmente de cemento, agregados (finos y gruesos) y agua. Contiene también alguna cantidad de aire atrapado y eventualmente puede contener aire incluido intencionalmente mediante el uso de un aditivo o de cemento incluso de aire (Sánchez De Guzmán, 1996). Esta piedra artificial, recién preparado tiene un aspecto fluido viscoso, propiedad que le permite moverse con facilidad relleno completamente las formaleas de las estructuras. Con el tiempo y bajo condiciones de exposición aceptables (temperatura y humedad), el material se convierte en un sólido capaz de mantener su forma y soportar cargas externas con un comportamiento que se puede considerar elasto-plástico (Giraldo, 1987).

#### ***Sus componentes.***

*Cemento:* conglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, permitiendo unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas. Al hablar de cemento, implícitamente se trata de cemento portland o cemento a base de portland, el cual tiene propiedades de fraguar y endurecer en presencia de agua (pasta de cemento) puesto que con este experimenta una reacción química llamado hidratación. Es por esto que también son conocidos como cemento hidráulico (Sánchez De Guzmán, 1996).



*Figura 1.* Polvo de cemento. Fuente: mssingenieros.com

*Agua.* es el componente que da la trabajabilidad necesaria para las mezclas de mortero y concreto y responsable por la ocurrencia de las reacciones de hidratación de los compuestos del cemento, permitiendo que estos puedan fraguar y endurecer, creando estructuras sólidas.

*Aire.* es normal que quede aire incluido durante el proceso de mezclado, el cual luego es liberado de forma parcial, por los procesos de compactación a los que es sometido el concreto durante su colocación. En algunas ocasiones se incluyen burbujas de aire intencionalmente, por medio de aditivos, con fines específicos.

*Agregados o áridos.* son todos aquellos materiales granulares, sean finos o gruesos según su tamaño y naturales (ver figura 2) o artificiales según su procedencia. Poseen una resistencia propia suficiente, actúan como material rellente (70-80% en volumen del concreto) haciendo más económica la mezcla. No afectan las propiedades y características del concreto por lo que en general la mayoría son inertes, es decir, no desarrollan ningún tipo de reacciones con los demás componentes del concreto, en especial con el cemento, evitando así perturbar el proceso de endurecimiento. Además, garantizan una adherencia suficiente con la pasta endurecida de cemento portland y proporcionan gran parte de la resistencia mecánica característica del concreto.

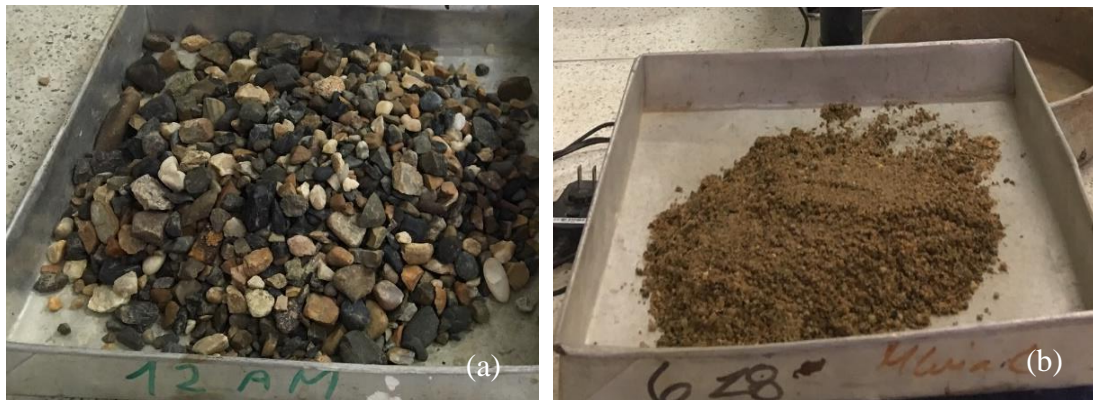


Figura 2. Agregado grueso natural (a). Agregado fino natural (b). Fuente propia.

### **Residuos de construcción y demolición (RCD).**

Es cualquier residuo inerte generado en obras de construcción, reparación, remodelación y demolición de edificios e infraestructuras (Palacio León, Oscar; Chávez Porras, Álvaro; Velásquez Castiblanco, 2017).

En la figura 3 se muestran los RCDs encontrados en distintos puntos de Barranquilla.

### ***Procedencia de los RCD.***

Es una de las formas de clasificar los RCD. A nivel internacional según lo expresa (Pacheco et al., 2017) se puede catalogar de la siguiente forma:

- Materiales de excavación (tierra, arena, grava, rocas, etc.)
- Construcción y mantenimiento de obras civiles (asfalto, metales etc.)
- Materiales de demolición (bloques de concreto, ladrillos, yeso, porcelana, cal etc.)

Es importante saber la procedencia de los áridos reciclados, por lo que a partir de una cuidadosa selección de este se logra prevenir los sobrecostos imputados a los tratamientos necesarios para no desmeritar su calidad (Gámez García, Saldaña Márquez, Gómez Soberón, & Corral Higuera, 2017).





Carrera 49c con calle 96, barrio El Poblado.



Carrera 63 con calle 52, barrio Modelo.



Carrera 41 con calle 56, barrio Boston.



Calle 50 con 29, barrio Chiquinquirá.

Figura 3. RCDs en distintos puntos de Barranquilla. Fuente: propia.

### ***Clasificación de los RCD.***

Según Decreto 838 y 4741 de 2005 de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, clasifica los RCD de la siguiente forma:

**Tabla 1.***Clasificación de los RCD en Bogotá.*

CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) PARA LAS ETAPAS CONSTRUCTIVAS			
CATEGORIA	GRUPO	CLASE	COMPONENTE
A. RCD APROVECHABLE	I-Residuos comunes inertes mezclados	1. Residuos pétreos	Concretos, cerámicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmento de rocas, baldosín, mortero y materiales inertes que no sobrepasen el tamiz #200 de granulometría
	II- Residuos comunes inertes de material fino	1. Residuos finos no expansivo	Arcillas (caolín), limos y residuos inertes, poco o no plásticos y expansivos que sobrepasen el tamiz #200 de granulometría
		2. Residuos finos expansivo	Arcillas (montmorillonitas) y lodos inertes con gran cantidad de finos altamente plásticos y expansivos que sobrepasen el tamiz # 200 de granulometría
	III- Residuos comunes no inertes	1. Residuos no pétreo	Plásticos, PVC, maderas, cartones, papel, silicona, vidrios, caucho
	IV- Residuos metálicos	1. Residuos de carácter metálico	Acero, hierro, cobre, aluminio, estaño y zinc
	V- Residuos orgánico	1. Residuos de pedones	Residuos de tierras negras
2. residuos de cespiones		Residuos vegetales y otras especies bióticas	
B. RCD NO APROVECHABLES	VI- Residuos contaminantes	1. Residuos peligrosos	Desechos de productos químicos, emulsiones, alquitrán, pinturas, disolventes orgánicos, aceites, asfalto, resina, plastificantes, tintas, betunes, barnices, tejas de asbesto, escorias, plomo, cenizas volantes, luminarias convencionales y fluorescentes, desechos explosivos y otros elementos peligrosos
		2. Residuos especiales	Poliestireno-icopor, cartón-yeso, drywall, todos los residuales de compuesto.
		3.Residuos contaminado	Materiales pertenecientes a los grupos anteriores que se encuentre contaminados con residuos peligrosos y especiales

*Fuente: Guía para la elaboración del Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra. Secretaría Distrital de Ambiente, 2015.*

### ***Residuo de concreto.***

Este material es un tipo de residuo de construcción y demolición, procedente de los restos de concreto para cualquier finalidad (pavimento y/o edificación). Según la tabla 1 se clasifica como A-I-1, correspondiente a la clase de residuos pétreos, del grupo de residuos comunes inertes en la categoría de RCD aprovechable.

### ***Agregados Reciclados.***

Como ya se mencionó, los agregados son materiales teóricamente inertes con forma granular que componen gran parte del volumen total del concreto. Hablando específicamente sobre los Agregados Reciclados (AR), estos se pueden considerar como todo aquel árido que proviene de la recuperación y el tratamiento los residuos procedentes de concreto, cerámicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmento de rocas, baldosín, mortero y materiales inertes que no sobrepasen el tamiz #200 de granulometría.

### ***Gestión integral de los RCD.***

Es el conjunto de actividades dirigidas a prevenir, reducir, aprovechar y disponer finalmente los RCD (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). En Barranquilla a través de la Resolución 1482 del 2017 en su artículo tercero se definen unos términos para efectos de su aplicación, sin embargo, solo se citarán unos conceptos puntales con el fin de contextualizar el enfoque del proyecto desde el punto de vista de la gestión integral:

- Generador de RCD: persona natural o jurídica que, con ocasión de la realización de actividades de construcción, demolición, reparación o mejoras locativas, genera RCD.

- Gestor de RCD: es la persona que realiza actividades de recolección, transporte, almacenamiento, aprovechamiento y/o disposición final de RCD.
- Demolición selectiva: es la actividad planeada de desmantelamiento que busca obtener el aprovechamiento de los residuos de una demolición.
- Almacenamiento: ubicación temporal de los RCD en recipientes, contenedores y/o depósitos para su recolección y transporte con fines de aprovechamiento o disposición final.
- Sitio de disposición final de RCD (anteriormente conocido como escombrera): es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de RCD, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de dichos residuos.
- Aprovechamiento de RCD: es el proceso que comprende la reutilización, tratamiento y reciclaje de los RCD, con el fin de realizar su reincorporación al ciclo económico.
- Puntos limpios: son los sitios establecidos para que el gestor realice separación y almacenamiento temporal de los RCD.
- Plantas de aprovechamiento: son las instalaciones en las cuales se realizan actividades de separación, almacenamiento temporal, reutilización, tratamiento y reciclaje de RCD.
- Programa de manejo ambiental de RCD: es el instrumento de gestión que contiene la información de la obra y de las actividades que se deben realizar para garantizar la gestión integral de los RCD generados.

**Estudio de prefactibilidad.**

Un estudio de prefactibilidad engloba el análisis técnico y económico de la o las alternativas que dan solución a un problema. En este caso el objetivo es evaluar la valorización de los RCD en Barranquilla y concluir si la alternativa de usar estos como agregados en el concreto es previamente factible o no, o en su defecto se debe recomendar alguna de las siguientes decisiones:

- Postergar el proyecto
- Reformular el proyecto (Ofreciendo posibles mejorar o proyectos futuros)
- Abandonar el proyecto
- Continuar su estudio a nivel de factibilidad (Definir áreas que necesiten un estudio más profundo)

Por lo anterior, y según las búsquedas relacionadas un estudio de prefactibilidad debe tener por lo mínimo los siguientes aspectos (ver figura 4), mismos que sustentan el desarrollo de esta investigación:

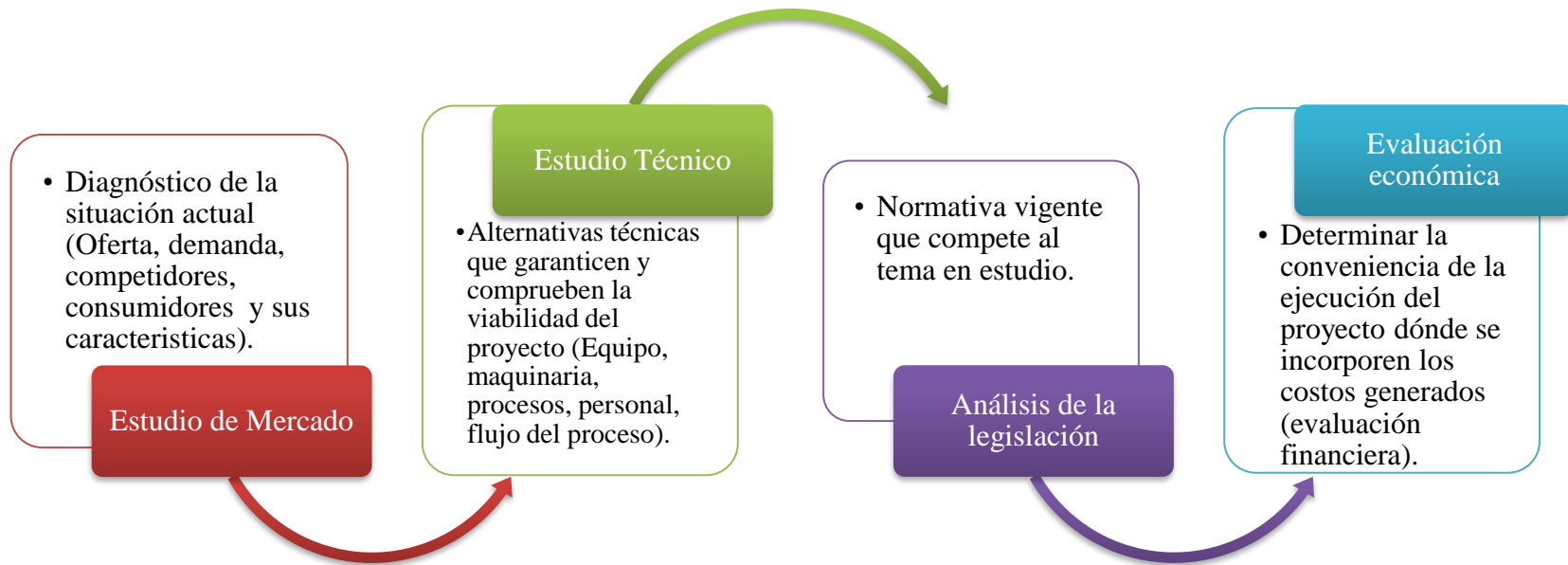


Figura 4. Representación gráfica de las etapas de un estudio de prefactibilidad. Elaboración propia. Fuente: (Leonardo Solarte Pazos, 2001)

## Marco Teórico

A continuación, se presenta las teorías y método en el que se sustenta esta investigación.

### **Diseño de mezcla: método de la A.C.I 211.**

De acuerdo a lo expresado por Sánchez de Guzmán, el diseño de mezcla de concreto es un proporcionamiento de los materiales que constituyen el concreto, que consiste en la selección de los ingredientes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y la determinación de sus cantidades relativas para producir concreto, teniendo en cuenta los requerimientos de manejabilidad, resistencia mecánica apropiada, durabilidad, peso unitario, apariencia adecuada entre otros. Sin olvidar los límites presupuestales que el proyecto establezca.

Actualmente existen muchos métodos de diseño de mezclas, generalmente agrupados en dos categorías. Por un lado los que utilizan combinaciones granulométricas ideales para el concreto, por ejemplo: Fuller - Thompson, Bolomey, Weymouth, Faury, Joisel, Valette, etc. (Giraldo, 1987).

Por otra parte, los que utilizan resultados empíricos, como lo es el método propuesto por La American Concrete Institute (A.C.I) “Práctica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado ACI - 211”, siendo este el más común y utilizado en muchos países, incluyendo Colombia (Sánchez De Guzmán, 1996). Este método se fundamenta en los resultados de extensas investigaciones en el campo del concreto de manera experimental, basándose en la metodología de ensayo y error.

La selección de las proporciones debe estar basada en datos de ensayos de las propiedades de los materiales o en experiencia previa con los materiales que de verdad se van a usar. El procedimiento de diseño consta pasos mostrados en la figura 5:



Figura 5. Procedimiento de diseño de mezcla. Elaboración propia. Fuente: libro de tecnología del concreto y mortero de (Sánchez De Guzmán, 1996).



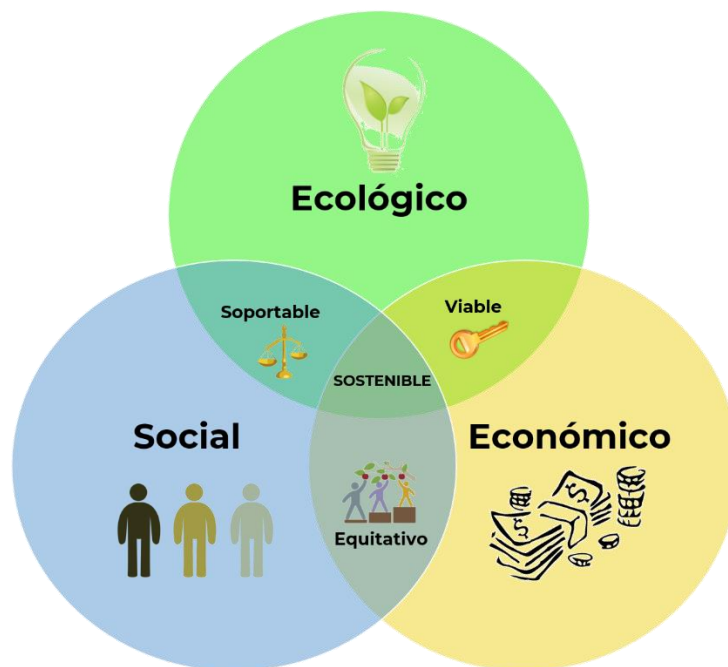
**Economía circular.**

Económicamente, este proyecto busca cambiar la mentalidad de considerar a los RCD como un fin último de vida por la posible restauración de los mismos, esto es lo que actualmente se conoce en la literatura como economía circular, definido como aquel sistema industrial restaurativo o regenerativo que propende estrategias como el uso de energía renovable, eliminar el uso de químicos tóxicos que impiden la reutilización, y la más aplicativa en el presente eliminar el desperdicio a través del diseño superior de materiales, productos, sistemas y/o modelos de negocios entre otros. (Mahpour, 2018)

Por lo anterior, la economía circular ha recibido una importante atención gubernamental, académica y organizativa como alternativa a la economía lineal existente de productos convencionales debido a que su línea de razonamiento se sustenta en la base de la cuna a la cuna y ecológico (Mahpour, 2018). Es decir, desde el origen un producto se utiliza y regresa al origen propio o uno alterno (Bermejo Urzola, 2016). Podría decirse que la economía circular representa un escalón para una gestión óptima de los residuos de C y D, sin olvidar mantener la calidad de los resultados que se generen (Mahpour, 2018).

**Desarrollo sostenible.**

Para finalizar, tenemos el término sostenibilidad o desarrollo sostenible, el cual es la matriz en la que se encausa todo lo anterior. La definición más aceptada a nivel mundial es la clásica del informe Brundland de la ONU (1987), el cual dice “Desarrollo sostenible es el que atiende las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para atender a sus necesidades y aspiraciones”. Esto ha surgido como el principio rector para el desarrollo mundial a largo plazo y para alcanzar este objetivo el desarrollo sostenible consta de tres pilares fundamentales (ver figura 6), en el cual se trata de lograr de manera equilibrada, el desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente (Organización de Naciones Unidas, 2015)



*Figura 6.* Representación gráfica de desarrollo sostenible. Elaboración propia. Fuente:(Organización de Naciones Unidas, 2015)

Este último, siendo el pilar de enfoque para esta investigación, puesto que defiende que la naturaleza no es una fuente inagotable de recursos y vela por su protección y uso racional (Acciona sa, 2017). Aspectos como la innovación en construcción y arquitectura sostenible contribuyen a lograr esta sostenibilidad ambiental desde varios frentes.

Uno de los frentes en el que se basa el desarrollo de este proyecto, es el principio de las 3R (ver figura 7) aplicados a la gestión de los RCD. Consta de *Reducir* la producción de residuos, *Reutilizar* lo que involucra la replicación de un material de modo que mantiene su forma e identidad original y *Reciclar* los residuos en un proceso en el que el material residual requerirá ser tratado, para luego ser sometido a un proceso de elaboración junto con otros insumos, de esta manera, se conservan las fuentes de los materiales manteniéndose alejados de los vertederos (Carcamo, 2008). Este principio permite tener una perspectiva clara ayudando a lograr una gestión ambiental basada en el uso racional de materiales que eviten la generación de residuos, alcanzándose una eficaz gestión de los RCD.

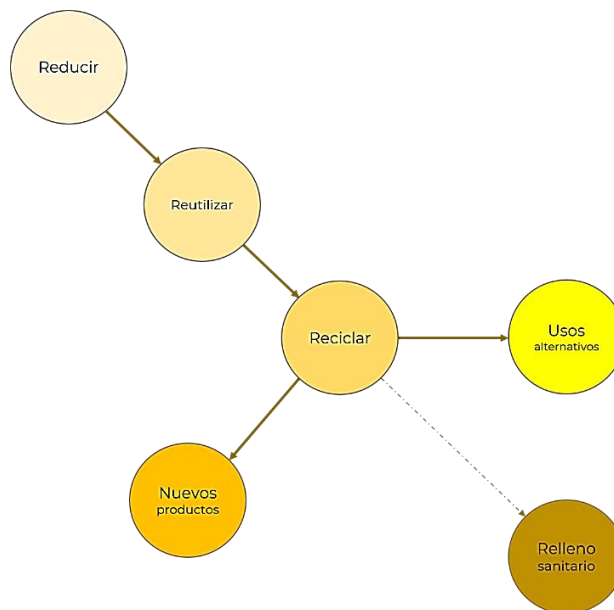


Figura 7. Alternativas para el manejo de RCD. Elaboración propia. Fuente: (Carcamo, 2008).

### Marco Legal

Desde el 2017 los RCD toman mayor importancia con la expedición de la resolución 0472 emitida por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, dónde se reglamenta a nivel nacional la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición o de otras actividades conexas en el territorio nacional.

En el casco urbano de la ciudad de Barranquilla el Establecimiento Público Ambiental (EPA) Barranquilla Verde, que deroga al antiguo DAMAB como autoridad ambiental, creó la Resolución 1482 del 2017 que tiene por objeto *“reglamentar el registro de generadores y gestores en el marco de la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición (RCD) en el distrito de barranquilla y se dictan otras disposiciones”*.

En la figura 8 se encuentra un resumen cronológico de las leyes, decretos y resoluciones que a lo largo de la historia han regido los avances, a nivel legal, de todos los parámetros de la gestión de los RCD en la nación y en el distrito de Barranquilla.

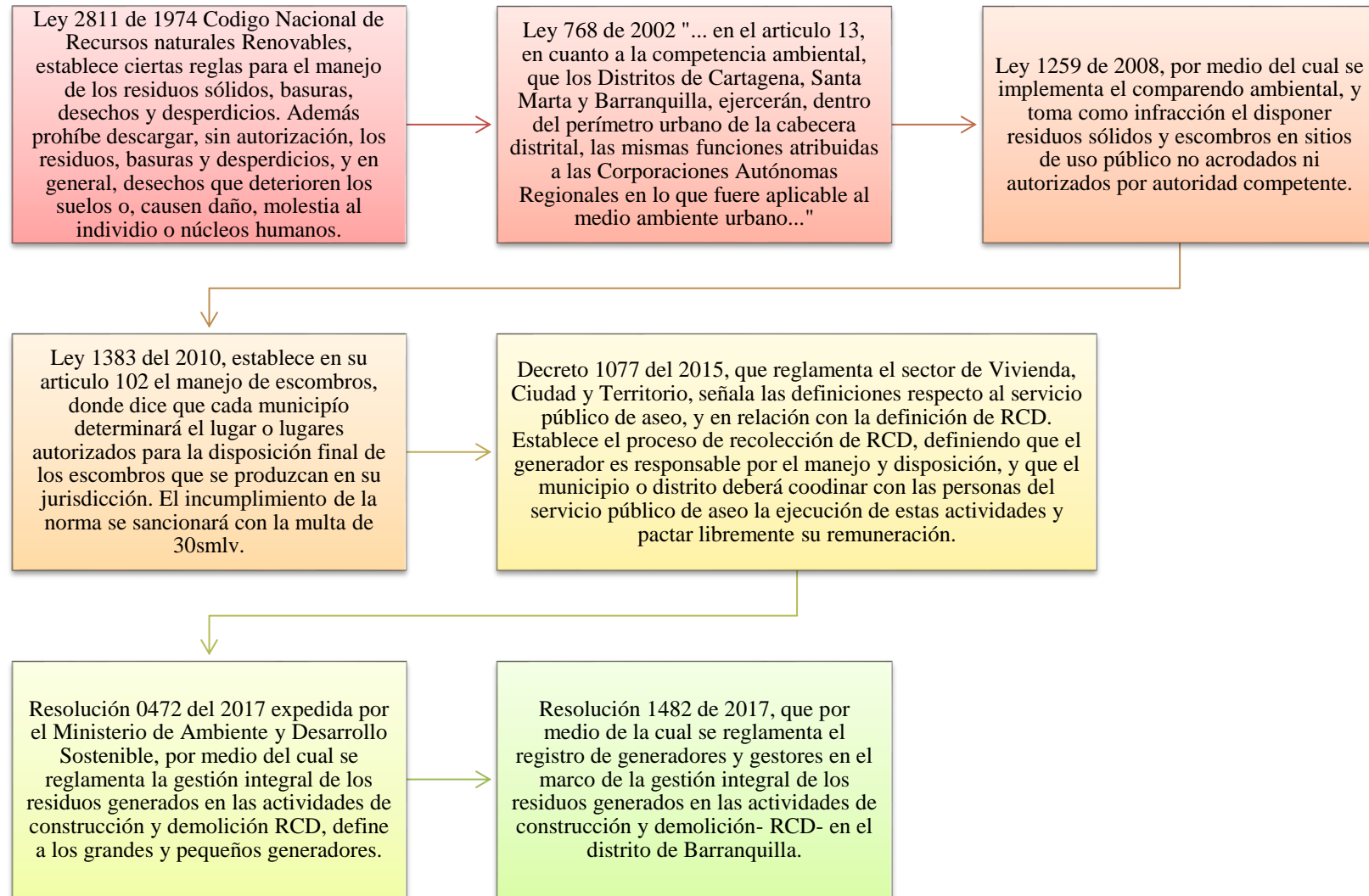


Figura 8. Resumen cronológico de las normativas relacionadas con la gestión integral de los RCD en Barranquilla. Elaboración propia. Fuente: Resolución 1482 del 2017 (Barranquilla Verde, 2017).

## Marco técnico

### **Propiedades físicas y mecánica de los agregados.**

- Granulometría: Se encuentra regido por la NTC 77 y tiene como objeto determinar la distribución de los tamaños de las partículas de los materiales propuestos para usar como agregados en una obra, a través de un proceso de tamizado.
- Densidad y absorción: la densidad se define como la relación de una masa por unidad de volumen. Se puede expresar esta propiedad en tres tipos de densidades tales como: densidad nominal (DN) que incluye los poros no saturables, densidad aparente (DA) que incluye los poros saturables y no saturables (sin incluir los vacíos entre partículas) y la densidad aparente saturada y superficialmente seca (SSS) que incluye la masa del agua dentro de los poros saturables después de una inmersión en agua por durante 24h. Por otro lado, la absorción se conoce como el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, encontrándose este superficialmente seco. Se encuentra regido por NTC 176 (agregado grueso) y la NTC 237 (agregado fino).
- Masa unitaria compactada y suelta: el procedimiento se encuentra en la NTC 92 y tiene como objeto determinar de la masa por metro cúbico de los agregados fino y gruesos y el volumen de vacíos que hay en la pasta de concreto o mortero, sin incluir el espacio de los poros en las partículas del agregado. En el sector de la construcción, esta propiedad sirve para establecer unidades de acuerdo para compra de material como arenas y gravas.
- Humedad: es aquella que en sus poros se encuentran en expuestos y que se pueden llenar de agua, lo cual hace necesario tener en cuenta para hacer correcciones a la dosificación, puesto que este porcentaje tiene un efecto negativo sobre la resistencia del concreto. El

procedimiento se encuentra descrito en la NTC 1776 y tiene como objeto determinar el porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado sometida a secado.

- Resistencia al desgaste: También llamado coeficiente de desgaste de Los Ángeles es el método que se emplea para determinar la resistencia al deterioro de agregados naturales o triturados, empleando la máquina de Los Ángeles. Conocer esta propiedad es importante en determinados casos como por ejemplo en la pavimentación rígida de carreteras. Se encuentra en la NTC 93 o INVE 218 - 07 y tiene como objeto determinar la resistencia al desgaste de los agregados gruesos.

#### **Propiedades físicas del concreto en estado fresco.**

- Asentamiento: este ensayo se realiza para determinar la trabajabilidad del concreto fresco, la cual es importante en los procesos de mezclado, transporte, vaciado, consolidado y terminado de este material. La NTC 396 muestra el procedimiento del ensayo y tiene como objeto determinar el asentamiento del concreto en obra o en laboratorio.
- Masa unitaria, rendimiento y contenido de aire: la NTC 1926 lo prescribe y tiene como objeto determinar de la masa por metro cúbico de concreto fresco mezclado y el volumen de vacíos que hay en la pasta de concreto o mortero, sin incluir el espacio de los poros en las partículas del agregado.
- Resistencia a la compresión simple: es la medida de la propiedad mecánica más común del concreto, dada a la importancia que reviste esta característica dentro de una estructura convencional de concreto reforzado. Su desempeño se emplea para el diseño realizado y se mide fracturando las probetas en la máquina de ensayo a compresión (ver figura 9).

Sus unidades son expresadas en libra-fuerza por pulgada cuadrada [psi] y en megapascuales [MPa]. La NTC 673 describe el procedimiento a seguir en la aplicación del ensayo y tiene como objeto la determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tales como cilindros moldeados y núcleos perforados.



*Figura 9.* Máquina del ensayo de compresión utilizada. Fuente propia.



### **Capítulo 3**

#### **Estado del arte**

En la literatura se pueden encontrar investigaciones que promueven el estudio, la evaluación, caracterización, revisión y/o valorización de RCD propiamente bajo las condiciones ambientales, sociales, económicas y legales del lugar donde se llevan a cabo cada proyecto. Todos los anteriores tienen un punto en común, desarrollar iniciativas desde la sostenibilidad ambiental que la actualidad demanda, esto debido al sin número de investigaciones que han concientizado a la humanidad sobre los impactos ambientales que este sector genera en la sociedad.

A continuación, se describirán los trabajos científicos encontrados más relevantes que contribuyen en el reconocimiento del estado actual de los RCD a nivel mundial, nacional y local.

La Unión Europea recomienda según el enfoque teórico que la mejor forma para definir los RCD es tener en cuenta tanto su naturaleza (materiales utilizados en edificios) y las actividades que lo originan (construcción y actividades de demolición), independientemente de quién realiza estas actividades (European Commission, 2011).

Algunos países europeos presentan grandes cantidades de escombros generados y otros por el contrario presentan muy pocos; sin embargo, expertos aseguran que esta discrepancia se debe a la falta de control y registro que debería hacerse a los residuos (European Commission, 2011). Hay quienes también atribuyen razones económicas como variantes en la generación de los RCD puesto que proponen que esta depende de la tasa de nuevas construcciones, el crecimiento económico del lugar, hábitos arquitectónicos como los tipos de materiales preferidos entre otros.

Según (Bermejo Urzola, 2016), la generación anual de estos residuos es alarmante, por ejemplo, en la Unión Europea es del orden de 300 millones de toneladas, en Estados Unidos la cantidad aproximada es de 170 millones de toneladas, en Hong Kong llega a los 20 millones de toneladas y en Australia la suma asciende a 6 millones por año. En Sao Paulo, la ciudad más grande de Brasil, la producción de residuos de construcción y demolición llega a los 68 millones de toneladas anuales. En México, según un informe expedido en el 2015 por la secretaria del medio ambiente, la generación de estos residuos alcanza valores de 7,000 ton/día acorde estimaciones proporcionadas por las delegaciones políticas del Distrito Federal.

Ahora bien, de forma general los RCD son considerados como un conjunto; no obstante, hay países que sugieren clasificarlos como dos categorías diferentes por lo que los residuos de construcción tienen más potencial de ser reutilizados al estar menos mezclados y contaminados que los de demolición. Adicionalmente existe un factor que ha incentivado gradualmente a la práctica de reciclar escombros para generar materiales de óptimo desempeño en proyectos de construcción, el cual corresponde al costo de disposición final de estos mismos que en países europeos es oneroso, como también lo es el de los materiales pétreos para la producción de mezclas de concreto (Bedoya Montoya & Dzúl López, 2015).

A finales de los años 70, en Japón se implementó el primer tratamiento eficiente de los RCD, como resultado de la normativa que obliga a la utilización de agregados reciclados de concreto en las nuevas construcciones (Bermejo Urzola, 2016). Bedoya & Dzúl en su artículo, exponen que Holanda, Bélgica, Dinamarca, Alemania y Suiza emprendieron iniciativas mediante las cuales pudieron relacionar los aspectos normativos, técnicos-científicos, ambientales y económicos, y con ello propiciar un escenario que viabilizara una cultura del reciclaje de RCD y

posterior consumo de los productos reciclados ofertados. Las tasas de gestión de estos residuos llegan al 90% y en cuanto al reciclaje, en algunos se supera el 70%. En Sur América, Brasil fue el primer país en adoptar estas tecnologías al instalar una planta de tratamiento de RCD (Chávez Porras et al., 2013)

Por todo lo anterior, surge la duda ¿Por qué Colombia no podría asumir ese auto riesgo? En este orden de ideas, Bogotá resalta su posición como distrito capital y realiza para el 2014 un estudio de caracterización y cuantificación de los RCD con el fin de comprobar la necesidad y viabilidad de lanzar como propuesta la creación de una Unidad Logística de Reciclaje Piloto de RCD para Bogotá, este sirvió para concluir operaciones claves en el proceso como: tener un control y peso de los residuos, separación de materiales magnéticos, clasificaciones granulométricas, separación neumática y ciclos de trituración (Chávez Porras et al., 2013).

Gracias a estos resultados ahora la capital colombiana cuenta con una *Guía para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) en obra* que tiene por objeto: "Proporcionar al constructor las herramientas necesarias y adecuadas para formular, implementar y actualizar el Plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición, de tal manera que éste permita adoptar estrategias para minimizar la disposición y maximizar el aprovechamiento de los RCD derivados durante la ejecución de proyectos constructivos" (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015).

En la ciudad de Medellín opera SINESCO que tiene como propósito dar una solución a la problemática del manejo y recolección de estos residuos. En Santa Marta, el Decreto 063 del 29 de marzo de 2016 reglamenta el correcto manejo, transporte y disposición de escombros,

vegetales e inservibles en la ciudad y contempla sanciones a aquellas personas que incurran en esto, sin la debida autorización.

En América Latina y Colombia, los restos de concreto, ladrillo y mortero de pega son los residuos con mayor porcentaje de generación debido a que tienen técnicas constructivas similares (Osorio, 2015). No obstante, gracias a los avances tecnológicos, actualmente estos residuos tienen diversas aplicaciones en el sector de la construcción, siendo una forma usual procesarlos aplicando técnicas de triturado en toda la mezcla de material inerte y producirlo como agregados reciclados.

El área de mayor aplicación de estos tipos de árido reciclado es en pavimentos, donde ha sido utilizado como relleno para las capas de subbase y base (Mejía et al., 2013). De manera similar, los prefabricados de mobiliario urbano y bloques no estructurales destacan la reutilización de los RCD, ejemplos tangibles son la empresa Indural en Medellín, con catorce años en el mercado (Bedoya Montoya & Dzul López, 2015) y el emprendimiento IgNeo en Barranquilla con dos años de operación (<http://igneocolombia.com/>) ambas producen sus productos con incorporaciones que van desde 80% al 100% de reemplazo de agregados reciclados.

Con relación a la fabricación de concreto estructural, en Europa desde la década de los noventa la literatura técnica y científica ha corroborado que un concreto con incorporaciones de agregado grueso reciclado en un porcentaje en masa del 20 % se comporta de manera idéntica a un concreto con 100 % de agregados naturales (Bedoya Montoya & Dzul López, 2015) lo que contribuyó a que hoy en día existan normativas que regulen el uso de este tipo de árido promoviendo su uso en cualquier campo de la construcción.

En relación con los agregados reciclados provenientes de RCD pétreos, existe una empresa para el aprovechamiento y tratamiento de estos residuos en Bogotá y sus alrededores, bajo la modalidad de una gestión integral de escombros eficiente llamada Granulados Reciclados de Colombia GRECO SAS. Dentro de sus servicios se encuentran los productos reciclados para bases y subbases granulares, material de rellenos y recebos, gravas para concreto y asfalto (<https://recicladosgreco.com/>).

Por lo general, y según la revisión literaria, los agregados reciclados provenientes de los residuos de concreto son áridos más ligeros que presentan alta porosidad y por ende mayor absorción (Gámez García et al., 2017); no homogéneos y de calidad variable debido a su alto contenido de mortero residual (Hayles, Sanchez, & Noël, 2018) y partículas finas no deseables difíciles de identificar a simple vista (Martín Morales, Zamorano, Ruiz Moyano, & Valverde Espinosa, 2011). Esto sin un tratamiento debido influenciaría directamente en la relación a/c y por ende la trabajabilidad del concreto, arrojando un decremento de la resistencia deseada, aunque si se tiene especial cuidado en el diseño de mezcla, se puede lograr reemplazos del agregado grueso considerables.

En síntesis, los agregados reciclados presentan un comportamiento físico menor en comparación con el agregado natural, influenciando directamente en la resistencia deseada del concreto; sin embargo, se puede lograr en Barranquilla su revalorización si se tiene especial cuidado en el manejo de estos residuos conforme a las buenas prácticas que se ha encontrado a nivel internacional como casos de éxito, apuntando así a los índices de sostenibilidad que cualquier ciudad en desarrollo desea. Por otro lado, aún no hay normativas que regulen el uso de estos áridos en Colombia y se cree que esta brecha podría reducirse mejorando la relación

academia-estado-entidad privada, para que se trabaje en pro de la generación de proyectos que favorezcan y apoyen emprendimientos que busquen la revalorización y viabilidad de estos.

## Capítulo 4

### Metodología

#### Diseño Metodológico

La investigación consta de tres aspectos claves de estudio, los cuales son: el diagnóstico de la gestión integral de los RCD en Barranquilla, viabilidad técnica y evaluación socioeconómica de estos. En la tabla 2 se encuentran las etapas implementadas para desarrollar la investigación:

**Tabla 2.**

*Etapas de la metodología de la investigación.*

Etapas
<b>1. Diagnóstico general de la gestión integral de los RCD de Barranquilla</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Aplicación de encuestas a generadores del sector constructivo según los tipos de obra en ejecución en Barranquilla.</li><li>- Realización de entrevistas con entidades públicas y privadas relacionadas con la gestión de los RCD.</li><li>- Mapeo de los escombros vertidos en las rutas principales de Barranquilla</li></ul>
<b>2. Viabilidad técnica</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Inspección inicial del residuo de concreto: Selección e inspección visual del concreto de origen.</li><li>- Agregado grueso reciclado: Proceso de trituración para la obtención del AGR y aplicación de ensayos para agregados según la normativa.</li></ul>

- 
- Técnica de mejoramiento experimental (TME):  
Implementación de una técnica experimental que consiste en dos operaciones más luego de la trituración, aplicados a una cantidad representativa del AGR para el mejoramiento de las condiciones físico-mecánicas del árido, con el fin de evitar factores que puedan comprometer las propiedades mecánicas del concreto a fabricar.
  - Caracterización de los componentes del concreto:  
Comprende los ensayos de los agregados naturales con el fin de conocer las propiedades necesarias para la dosificación.
  - Elaboración de mezclas de concreto:  
Dosificación y elaboración de una mezcla de control (100% AGN) y cuatro (4) mezclas con diferentes porcentajes de reemplazo del AGN por AGR, 10%, 50% sin TME y 50% con TME.
  - Ensayos para el concreto en estado fresco y endurecido:  
Aplicación de los ensayos correspondientes al concreto en estado fresco y endurecido (ensayo de compresión) a través de probetas cilíndricas.
- 

### **3. Evaluación económica.**

---

- Análisis comparativo entre el comportamiento económico del concreto sostenible y el concreto convencional.
- 

*Nota: Elaboración propia.*

**Desarrollo Metodológico**

A continuación, se describen las actividades realizadas en cada una de las etapas antes mencionadas.

**Diagnóstico general de la gestión.**

Para conocer el contexto general que engloba los RCD de Barranquilla, se utilizaron fuentes de información primaria descritas a continuación:

***Encuestas.***

Se aplicaron de manera selectiva (ver anexo 1), a distintas obras en ejecución dentro del casco urbano de la ciudad de Barranquilla. Para ello se tuvieron en cuenta criterios mostrados en la figura 10.



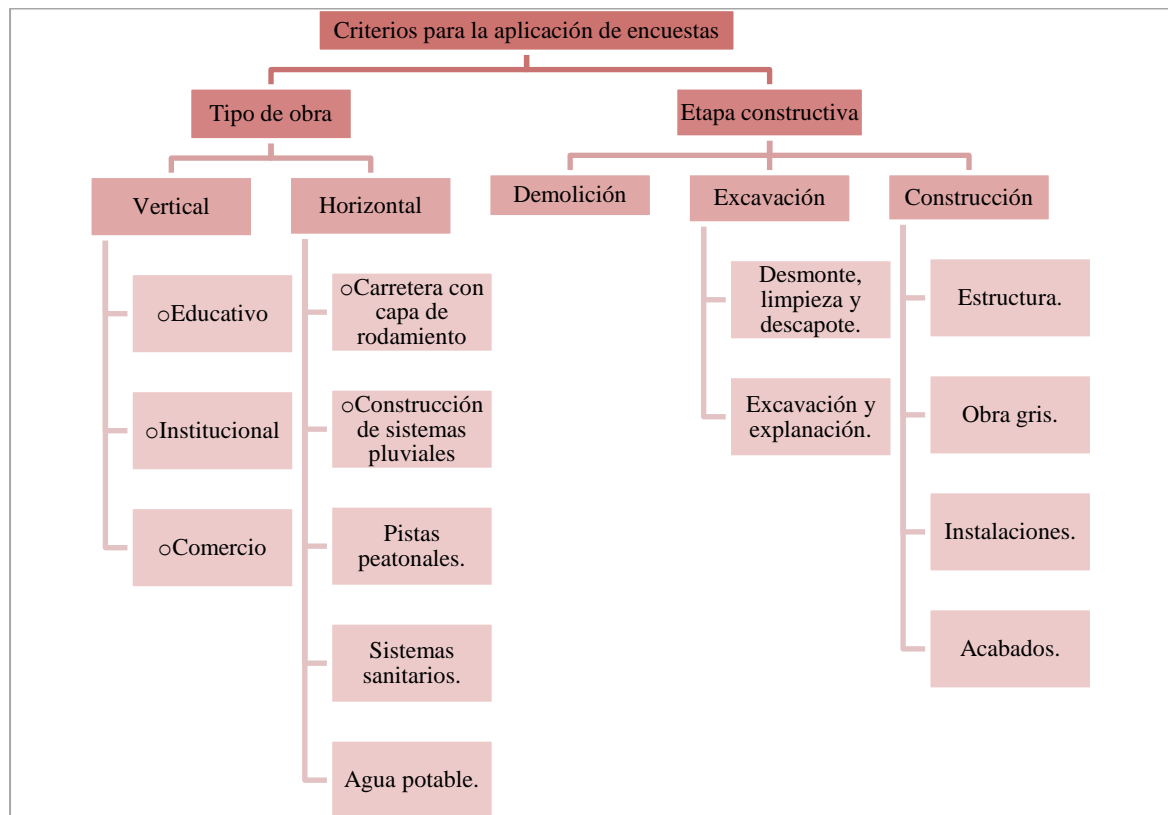


Figura 10. Representación gráfica de los criterios para la aplicación de encuestas. Elaboración propia. Adaptado de (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015)

### ***Entrevistas.***

Se identificaron los entes públicos y privados relacionadas con la gestión, regulación y control de los RCD en Barranquilla, se visualizó su partición en la cadena de productiva de los RCD (generadores, transportistas (recolector) y sitios de disposición final o plantas de aprovechamiento) y a partir de ese orden se concretaron reuniones por vía telefónica y por correo electrónico con cada una durante los meses enero y febrero del 2019.

Los aspectos para indagar en cada eslabón fueron: costos de operación, logística de transporte, prácticas de manipulación (cultura de disposición de los RCD) y dominio y cumplimiento de las normativas.

***Mapeo.***

De acuerdo con la distribución de las localidades de Barranquilla se identificaron las calles de mayor fluencia, en diferentes periodos de tiempo se hicieron inspecciones visuales y registro fotográfico de los escombros que están siendo vertidos inadecuadamente dentro del territorio urbano estudiado. Lo anterior con el fin de conocer:

- Extensión de algunos botaderos al cielo abierto.
- Frecuencia de los pequeños generadores con vertimiento de RCD en lugares aledaños a la obra.
- Relación entre las zonas de estratos sociales vs cultura de 3R.
- Registro de las construcciones, operaciones de remodelación o cualquier tipo de obra en ejecución.

***Viabilidad técnica.***

A continuación, se describen las actividades realizadas para el desarrollo experimental de esta fase.

***Inspección inicial del residuo de concreto (RC).***

El residuo de concreto (RC) se escogió de la demolición del pavimento rígido procedente de la calle 40 entre carrera 17 y 14 del suroriente de la ciudad de Barranquilla, a razón de las obras de canalización del arroyo de esta calle.

Con el fin de identificar posibles problemas de durabilidad debido a su desempeño durante su vida útil se realizó una inspección visual. Se logró reconocer que los fragmentos triturados eran amorfos, con vértices pronunciados, de textura rugosa y heterogeneidad en su matriz. Los

fragmentos eran en promedio de 30 cm en su mayor dimensión a causa del proceso propio de la demolición, como se puede observar en la figura 12



Figura 11. Fragmentos iniciales del residuo de concreto. Fuente propia.

***Agregado grueso reciclado (AGR): procesamiento.***

El procedimiento al que fue sometido el residuo de pavimento se describe en las siguientes operaciones, sin olvidar que el residuo original es producto propio de la etapa de demolición de la obra de canalización. Por consiguiente, se tiene que:

- a. Trituración primaria, en la planta de trituración (figura 12) de la cantera Munarriz ubicada en la vía al mar, Puerto Colombia, Atlántico compuesta por una trituradora de impacto de eje horizontal, una trituradora secundaria de cono, una zaranda vibrante que se utiliza para separar el producto en diferentes tamaños y las cintas transportadoras que trasladan el material para descargarse sobre las pilas

de diferentes tamaños. Esta trituración permitió la clasificación del material en tres tamaños máximos: finos,  $\frac{3}{4}$  y granzón. (ver figura 13)



Figura 12. Planta de trituración de la cantera Munarriz, ubicada en Puerto Colombia, Atlántico. Fuente propia.

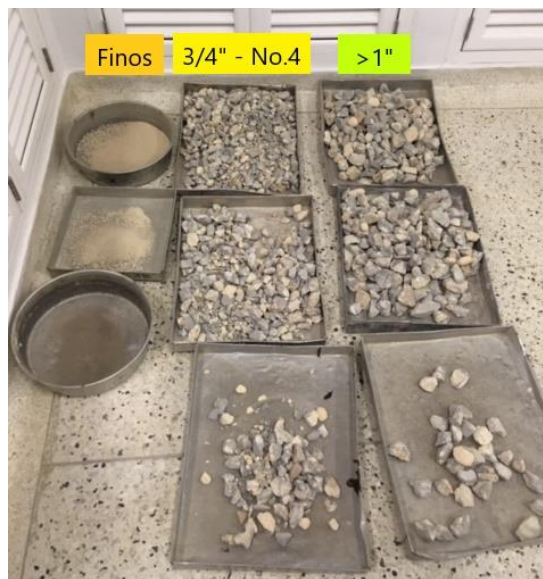


Figura 13. Separación del AR por tamaños máximos de partículas. Fuente propia.

- b. Trituración secundaria, está se aplicó al agregado con tamaño nominal mayor a  $\frac{3}{4}$ \" (granzón) resultado de la trituración primaria en una trituradora de mandíbula

de laboratorio 911MPEJC100-M / T (figura 14), gracias a la colaboración de la constructora ALB Ingeniería & Construcción a través de los ingenieros Roberto y Andrés Lewis.



Figura 14. Trituradora de mandíbula móvil de la constructora ALB Ingeniería & Construcción. Fuente propia.

- c. Tamizado (ver figura 15), a través de una tamizadora mecánica se separaron las fracciones mayores a 1” con el fin de preparar las muestras de AGR para los respectivos ensayos para agregados establecidos por la NTC 174, mostrados a continuación:

**Tabla 3.**

*Ensayos de Agregados según las NTC 174.*

---

Granulometría (agregado fino y grueso) – NTC 77

Densidad y absorción – NTC 176-237

Masa unitaria compactada o suelta – NTC 92

Humedad – NTC 1776

Desgaste en máquina de los Ángeles – NTC 93

---

*Nota: Elaboración propia.*



Figura 15. Tamizadora mecánica utilizada para realizar la granulometría del agregado reciclado. Fuente propia.

### ***Técnica de mejoramiento experimental (TME) del AGR.***

Según la literatura consultada, los agregados reciclados a partir de concretos reciclables son áridos que presentan alta porosidad, no homogéneos y de calidad variable. Su alto contenido de mortero residual y partículas finas no deseables se traduce en mayor absorción de agua, afectando a la relación a/c (Martín Morales et al., 2011).

Por lo anterior, en este proyecto se aplicó una técnica de mejoramiento experimental (TME) a una cantidad específica de AGR, basada en la investigación de Jiménez, Aponte, Vázquez, Barra, & Valls, 2013.

La idea es obtener un material lo más libre posible de excesos de mortero y finos, que mejore sus características físicas como la absorción y humedad contribuyendo en la trabajabilidad, resistencia del concreto resultante.



- Operación # 1 (Pulido): Se introdujeron aproximadamente 38,5kg de AGR en un tambor rotativo a una velocidad de 500 revoluciones durante 30 minutos; la finalidad primaria es desprender la mayor cantidad mortero residual y finos que el árido pueda contener, y segundo, buscar que el agregado adquiriera una forma más redondeada, todo lo anterior en consecuencia de la fricción que se produce entre los mismos fragmentos al estar en movimiento dentro del tambor. Ver figura 16(a).
- Operación # 2 (Lavado): Una vez pulido, se lavó el material con agua a presión logrando retirar gran cantidad de mortero residual desprendido del punto anterior y cualquier contenido de finos que el AGR presenciara. Ver figura 16(b).



(a)



(b)

*Figura 16.* Representación de la Técnica de mejoramiento experimental aplicada, Pulido (a) y lavado (b). Fuente propia.

### *Elaboración de Mezclas de Concreto.*

Se comenzó con los ensayos para conocer las propiedades físicas de los materiales utilizados. Para los agregados naturales, ambas fracciones (gruesa y fina) se recibieron como colaboración por parte de la cantera de **agregados Argos**; el agregado grueso natural (AGN) con un tamaño máximo nominal de 3/4", mismo tamaño elegido para el diseño de mezcla y el agregado fino natural (AFN) con un módulo de finura de 2,97. Para el cemento se adquirió de manera comercial el cemento portland de uso estructural de la empresa Argos en la presentación de sacos de 50kg; su ficha técnica indica que cumple con las especificaciones prescritas por la NTC 121 (tipo UG) (Argos, 2018).

Con la información anterior se procedió a realizar el diseño de mezcla, el cual se fundamentó en el Método de la ACI 211 como se mencionó en el capítulo 2, con ayuda del libro de Tecnología del concreto y motero de Diego Sánchez de Guzmán. La resistencia a la compresión especificada del concreto se estableció de 30 MPa y de manera investigativa el diseño será para elementos estructurales como muros reforzados, vigas y/o columnas con dimensión mínima de 10 cm.

Luego, se elaboraron cuatro tipos de mezclas de concreto con material reciclado y una mezcla de control con material natural. Los tipos de mezcla se definieron según el porcentaje de reemplazo de AGN por el AGR en volumen. Los porcentajes aplicados en este trabajo fueron de 10%, 50% sin TME y 50% con TME. Aquí se tomaron muestras de cada tipo de mezcla para realizar los ensayos del concreto en estado fresco. El equipo que se utilizó fue una mezcladora con motor Diesel con capacidad de 1.5 bultos, con potencia de 9 HP, como se observa en la figura 17.





*Figura 17.* Equipo utilizado para realizar las mezclas. Fuente propia.

Finalmente se elaboraron, curaron y ensayaron seis (6) probetas cilíndricas por cada tipo de mezcla, dando un total de 24 especímenes, para así hallar la resistencia a la compresión promedio a los 28 días. Esto siguiendo el procedimiento descrito en la NTC 550 “Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto en Obra”. En la figura 18(a) y 18(b) se muestran las probetas elaboradas y curándose respectivamente.

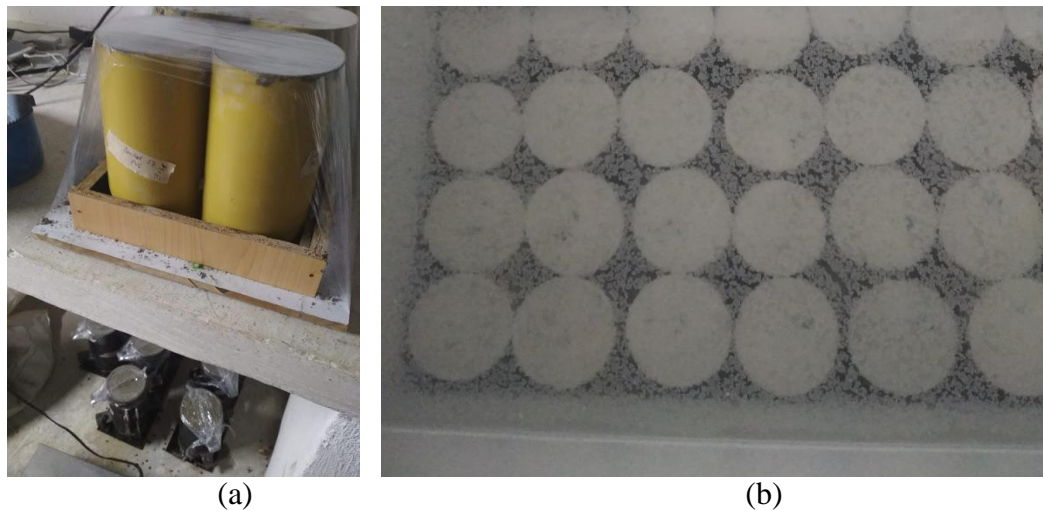


Figura 18. Elaboración de probetas cilíndricas para ensayo de compresión. Fuente: propia.

### ***Ensayos para concreto en estado fresco y endurecido.***

Se realizaron los ensayos correspondientes para analizar las características de las mezclas en estado fresco y endurecido. En la siguiente tabla se encuentra un resumen de todos los ensayos realizados, conforme a la NSR-10 y las Normas Técnicas Colombianas Vigentes:

Tabla 4.

*Ensayos para el concreto en estado fresco y endurecido.*

<b>Estado del concreto</b>	<b>Ensayo – Norma</b>
Fresco	Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto – NTC 396
Fresco	Determinación del Contenido de Aire en Concreto Fresco Método Volumétrico – NTC 1028
Endurecido	Ensayo de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto – NTC 673

*Nota: Elaboración propia.*

Nota: debido a factores externos de la investigación, fue necesario hacer uso de moldes de PVC de 4” largas, haciendo que las probetas elaboradas en estos moldes sean no normalizadas, no obstante, se tomaron las medidas pertinentes para realizar la lectura del ensayo con las correcciones adecuadas.

**Evaluación económica**

Desde la evaluación económica, se representa un escenario dónde el concreto sostenible es lanzado como producto al mercado colombiano. Los aspectos evaluados se dividen de la siguiente forma:

***Análisis de minimización de costos.***

Según las proporciones del concreto sostenible resultante del análisis de la viabilidad técnica, se seleccionaron los costos mínimos para la fabricación de  $1\text{m}^3$  de este concreto versus el concreto convencional.

**Capítulo 5****Resultado y análisis****Diagnostico general de la gestión de los RCD en Barranquilla**

Para obtener una panorámica del estado actual de los RCD se necesitaron confrontar dos perspectivas, la primera es de manera legislativa, es decir recolectar toda la información de fuentes secundarias cómo resoluciones, procedimientos y/o proyectos dispuestos documentalmente desde el auge de los RCD en la ciudad hasta la fecha, y la segunda forma es de tipo experimental, es decir, información tomada directamente del campo con fuentes primarias como encuestas y entrevistas aplicadas a las principales entidades relacionadas con el tema. A continuación:

**Legalmente ¿Qué debería hacerse?**

Con base en las legislaciones vigentes se presenta en la figura 19 la participación de cada uno de los tipos de entes involucrados en el proceso de generación y aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición, es decir, se resumen las funciones y responsabilidades para cada uno:

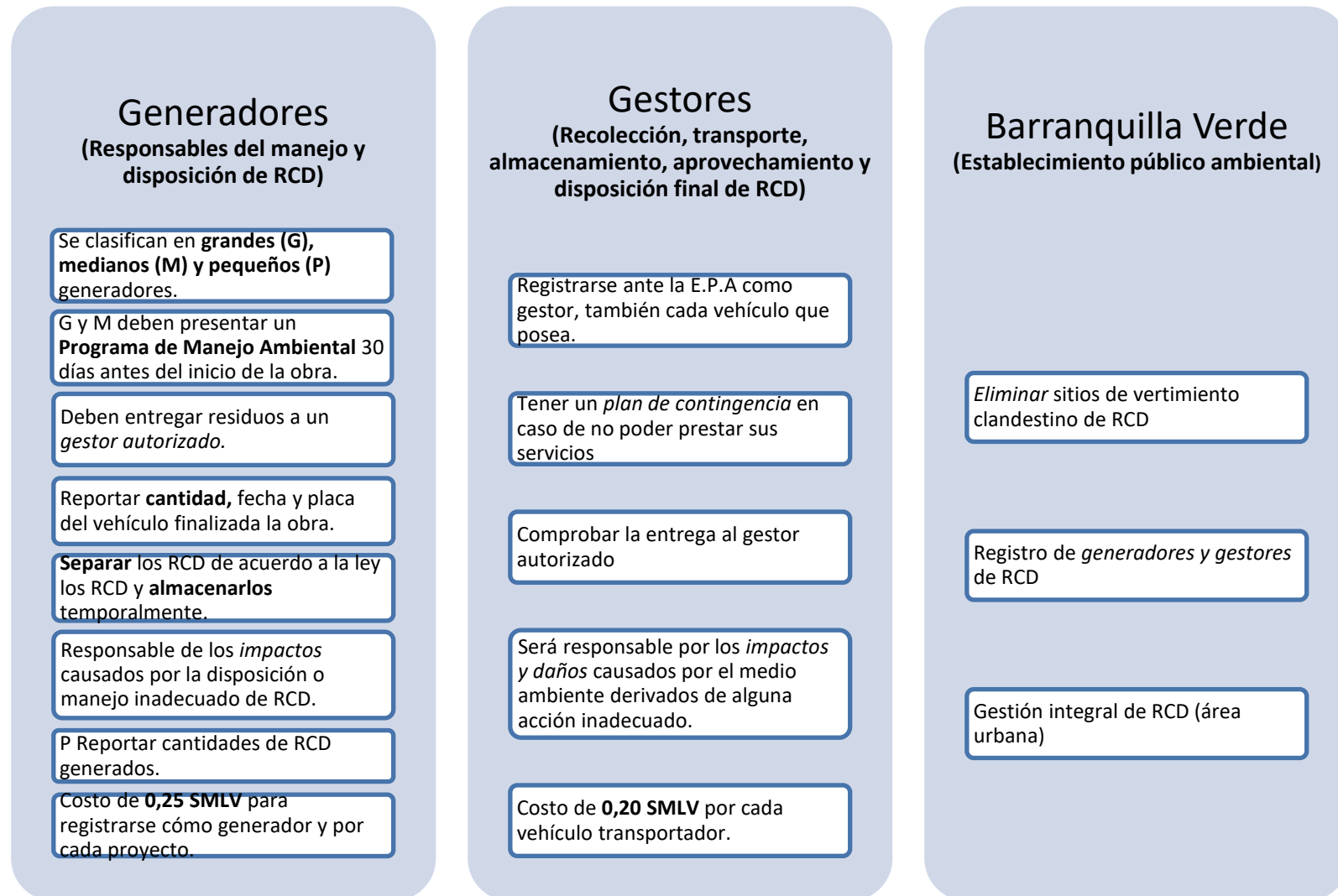


Figura 19. Participación de cada uno de los entes involucrados en la gestión de los RCD en Barranquilla. Elaboración propia. Fuente: (Barranquilla Verde, 2017).

El distrito es responsable de coordinar con el prestador de servicios públicos las actividades correspondientes y pactar libremente la remuneración considerada y a su vez proporcionar un lugar autorizado para la disposición. En la figura 20 se muestra una representación gráfica de los entes involucrados en la gestión de los RCDs de Barranquilla.

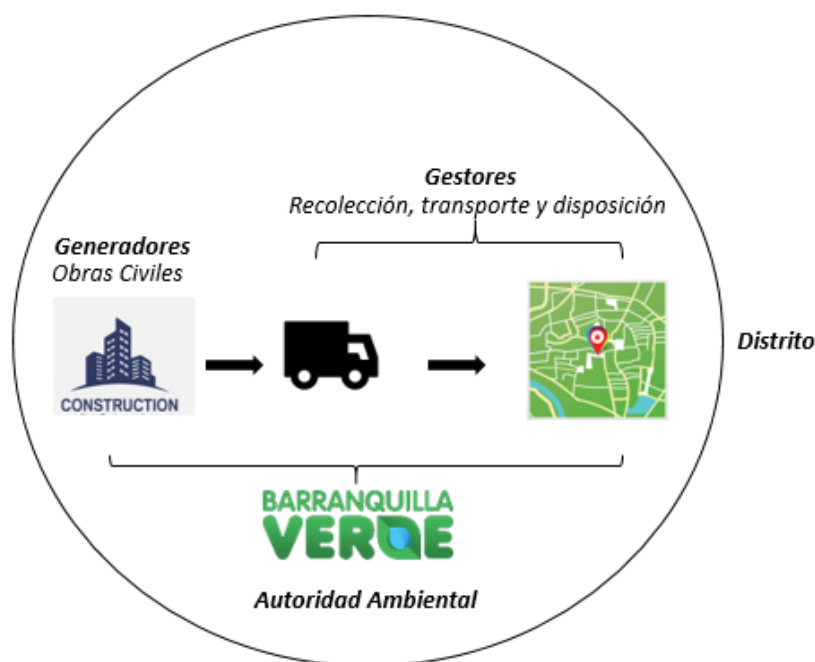


Figura 20. Representación gráfica de los entes involucrados en la gestión de RCD en Barranquilla. Elaboración propia.

### ¿Cómo se están gestionando los RCD actualmente?

Desde el 2015 la Secretaría de Planeación Distrital de Barranquilla determinó que los RCD son un problema con importancia de **atención nivel alto**. A partir de esta alarma se plantearon metas a corto y mediano plazo las cuales están enmarcadas en el PGIRS 2016 -2027. También tiempo después, en el 2017 entra en vigencia la resolución 1482 que busca fortalecer la gestión de los RCD.

A partir de lo anterior y con base en la información primaria recolectada en esta investigación se analizan los resultados para lograr establecer un diagnostico general de la gestión de los RCD.

***En contexto con los RCD.***

A pesar de que el termino RCD ha tenido auge en los últimos años, cerca de la mitad de las personas encargadas de las obras civiles encuestadas desconocen el significado de las siglas y su concepto en el campo (figura 22). De la misma forma, la divulgación de las normativas vigentes presenta fallas, puesto que más del 50% de los generadores ignoran la existencia de estas, sin diferenciar entre nacional y regional como lo muestra la figura 21.

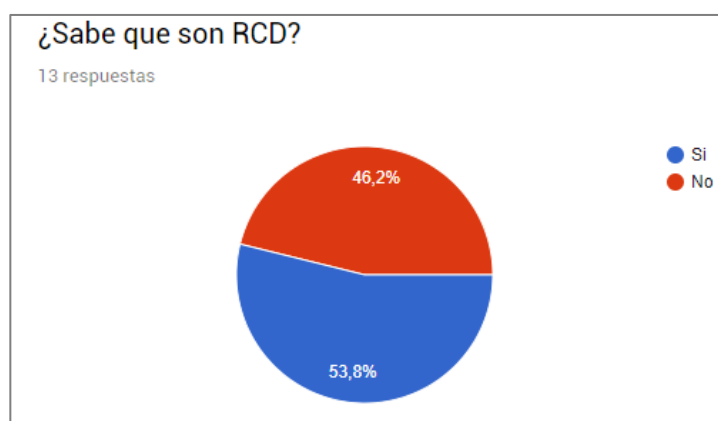


Figura 21. Dominio de concepto de RCD. Fuente propia.

El grupo de obras encuestados mostró un bajo control y acompañamiento por parte de Barranquilla Verde, puesto que se refleja desconocimiento en aspectos importantes de la normativa y en algunos casos la existencia de la misma legislación. Esta misma afirmación la comprobó el coordinador de escombros de la autoridad ambiental en la entrevista realizada, justificando que la causa de la falencia se debe al corto período de tiempo que ha transcurrido desde que la resolución entró en vigencia. Se muestran en la figura 22 y 23 los datos que sustentan lo anterior.

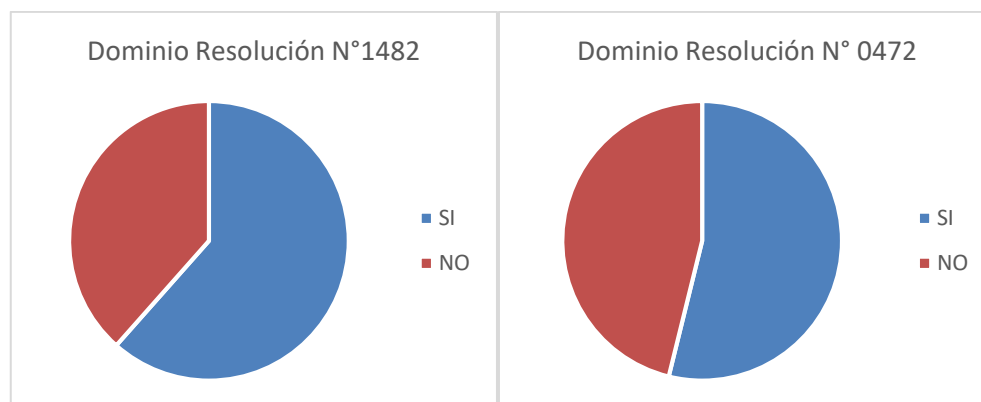


Figura 22. Conocimiento de las legislaciones vigentes relacionadas con los RCD. Fuente propia.



Figura 23. Conocimiento de las legislaciones vigentes relacionadas con los RCD. Fuente propia.

### *Características y cantidades de los RCD en promedio.*

Finalizando el 2016 Barranquilla debió haber tenido una caracterización de los RCD. Sin embargo, hasta la fecha se desconoce algún dato que describa las cualidades o el estado en el que se recolectan, transportan o disponen los RCD, específicamente los dispuestos por el operador de **servicios públicos** (Triple A S.A. E.S.P.) en el P.A. Los Pocitos, afirma el coordinador de escombros de la entidad en mención. Aseguran encargados del área que sus actividades se



resumen en: recolectar conforme a las solicitudes diarias de los generadores a través de cuadrillas y volteos, transportar y disponer para que este luego sea utilizado como material de relleno.

A partir de la clasificación de los RCD expuesta en el capítulo 2 se investigó en las obras encuestadas cuales de estos tipos de materiales pueden encontrarse con mayor frecuencia en Barranquilla, y se concluyó que la generación de residuos tóxicos o peligrosos es casi nula, sin embargo, en los pocos casos en los que amenaza con presentarse se debe a los gases emitidos por los aceites o combustibles usados por la maquinaria del proyecto. En medio de la investigación se notó que la composición y cantidad de los RCD generados en una obra puede ser influenciada por la etapa constructiva en la que esta misma se encuentra. Para el caso de concreto residual la etapa de demolición es fundamental puesto que es donde se generan más cantidades, para los materiales como arenas, cimentaciones y demás se relacionan directamente con la etapa de excavación y adecuación de terrenos.

Con base en los resultados, se propone el siguiente gráfico que muestra a grandes rasgos la composición de los RCD encontrados, ver la figura 24.



Figura 24. Clasificación general de los RCD encontrados. Fuente propia.

En cuanto a cantidades, aun cuando gran porcentaje de las obras encuestadas estaban en etapa de acabados (figura 25) se registró que en promedio se están generando más de 24m<sup>3</sup> de RCD mensualmente como se muestra en la imagen 26

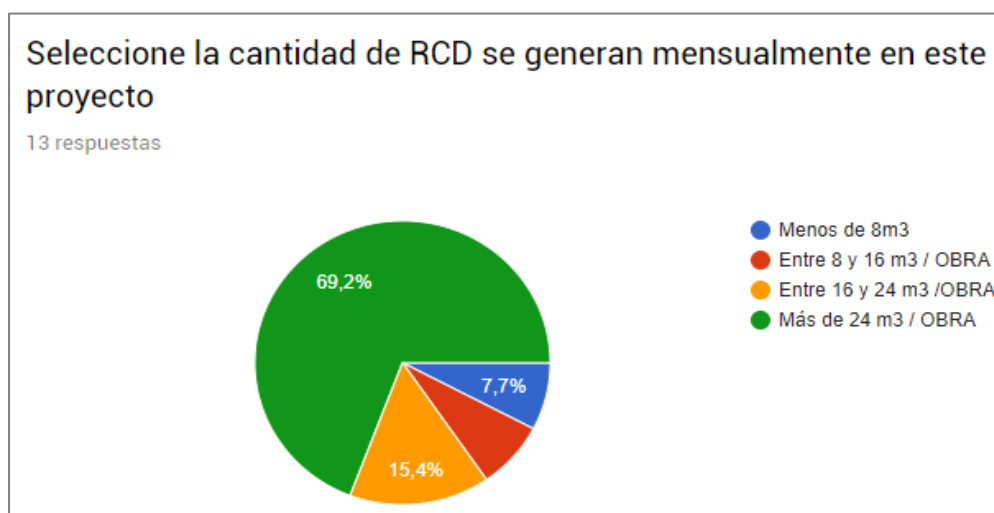


Figura 25. Etapas Constructivas de las obras encuestadas. Fuente propia.

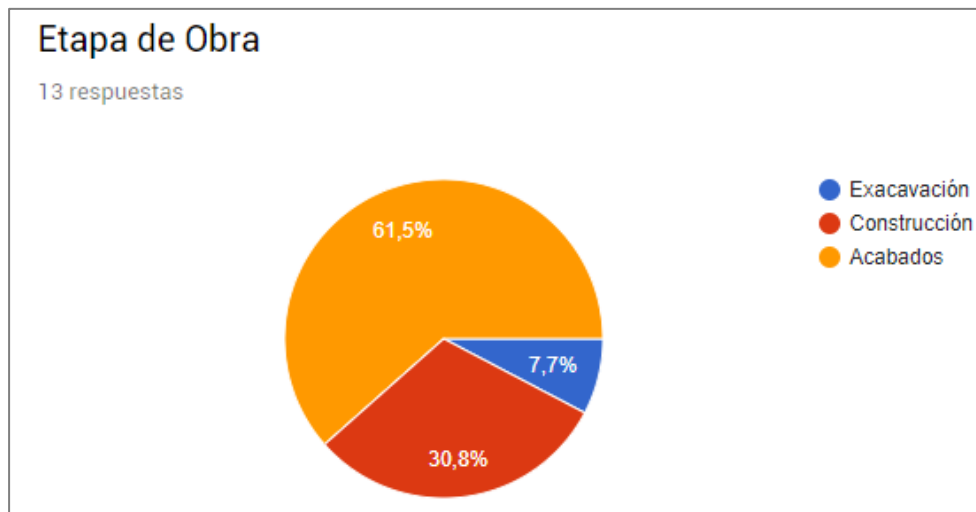


Figura 26. Cantidad de RCD que se generan mensualmente en excavación, construcción y acabado. Fuente propia.

Para concluir un caso especial son las obras horizontales, en una de las obras encuestadas aún en construcción había registrado hasta la fecha más 1000m<sup>3</sup> de RCD en promedio por mes, de los cuales 1.402.527m<sup>3</sup> fueron residuos de excavación y casi 2000 toneladas en residuos pétreos.

### *Cadena productora de los RCD.*

Con base en información de algunos generadores de RCD se sintetizó el proceso de gestión actual de los residuos como se muestra en la figura 27.

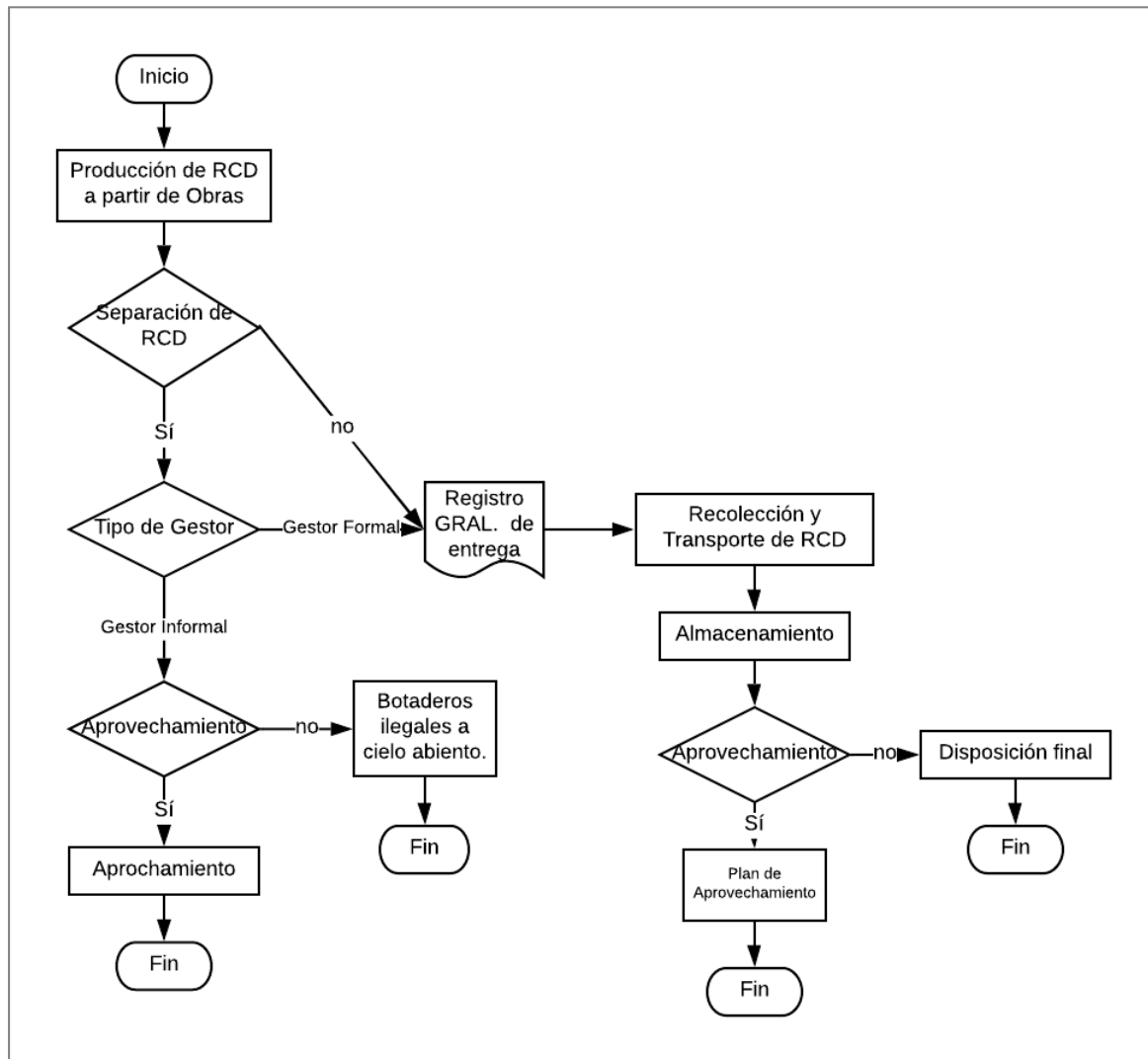


Figura 27. Flujograma del proceso actual productor de RCD. Elaboración propia.

A pesar de que la separación de los residuos en fuente es una operación exigida por la autoridad ambiental aún hay empresas que ignoran este paso por razones justificadas, pues bien, testifican que de hacerla sería una operación en vano porque al momento de trasladar los

residuos, el gestor sin darle importancia recolecta y transporta todos los residuos revueltos. En la figura 28 se sustenta lo anterior.

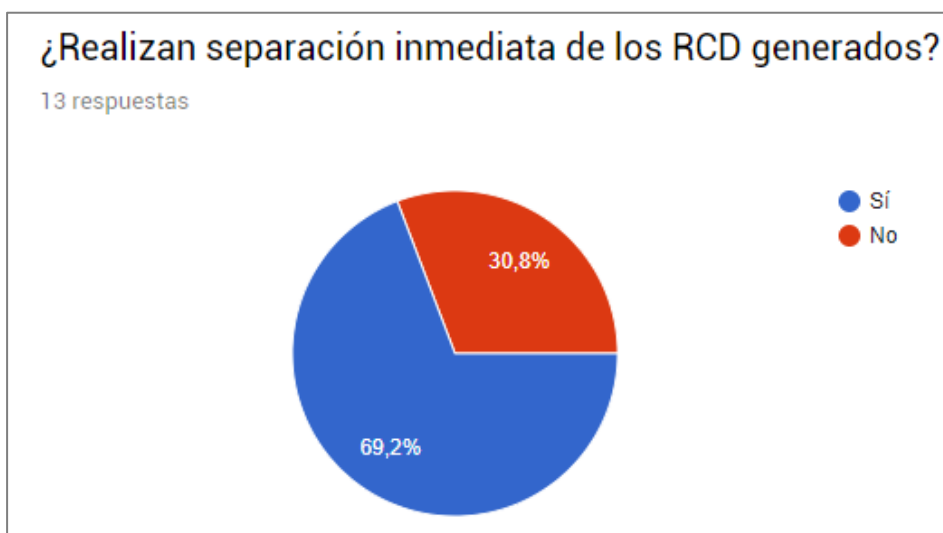


Figura 28 Generadores que separan los RCD in situ. Fuente propia.

Según el anexo III de la resolución 1482 de 2017 siempre que los residuos sean entregados a un gestor formal debe hacerse un registro de las cantidades y materiales específicos que son entregados, sin embargo, Barranquilla Verde no tiene en su poder registro de los mismos. Estas situaciones generan desinterés en cualquiera de los involucrados en el proceso, puesto que se fomenta una posición subestimada del control y seguimiento necesario para fortalecer la gestión de los RCD.

No está demás confesar que los generadores, específicamente, ya refugian parte de sus actividades con gestores informales como “carremuleros”, compradores minoristas y demás, incidiendo en prácticas como “reventa” de materiales o vertimiento de estos en botaderos ilegales a cielo abierto, justificándose en la rapidez del servicio, la cantidad mínima de residuos o

los costos más “económicos” que los requeridos por los gestores formales. Como sustento de lo anterior, en la figura 29 se muestran los gestores más frecuentados por los proyectos civiles.

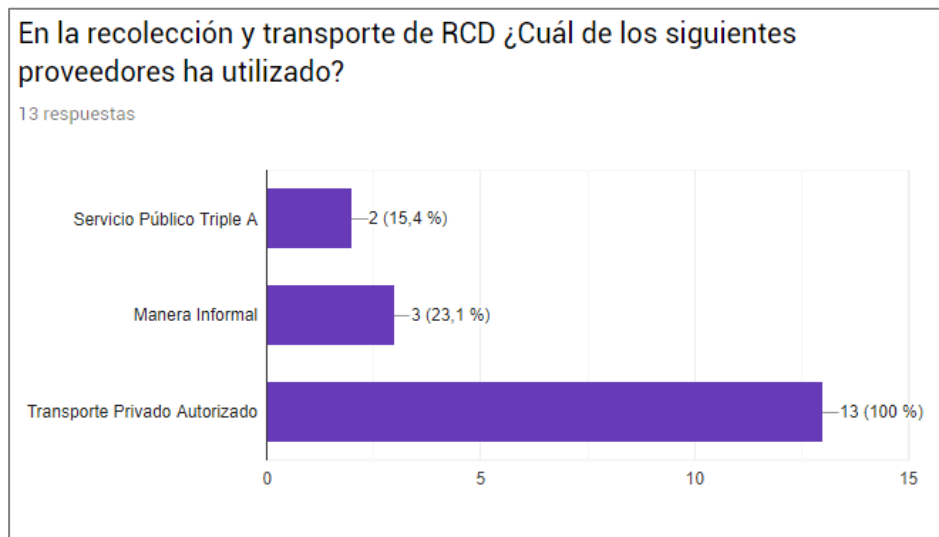


Figura 29. Gestores más frecuentados por los generadores. Fuente propia.

El fin último de toda la cadena de gestión de los residuos prevalece en aprovechar al máximo los RCD, esto incluye desde arenas hasta materia orgánica. No obstante, pocos interesados en la gestión se preocupan por conocer el destino final de los residuos, el lugar u objeto de aprovechamiento (ver figura 30).

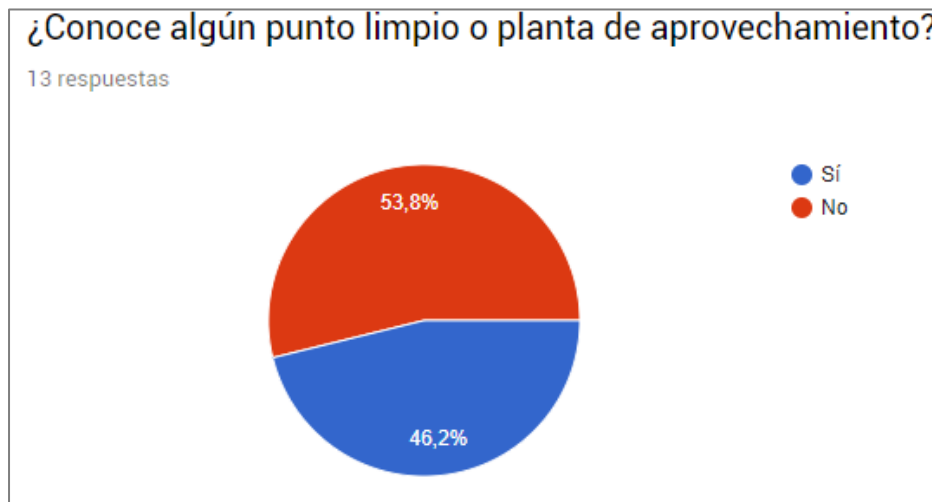


Figura 30. Conocimiento de algún punto limpio o planta de aprovechamiento. Fuente propia.

Según la C.R.A como se observa en la tabla 5, en Barranquilla hasta la fecha se han entregado exactamente 10 licencias autorizadas a gestores de RCD de las cuales 7 tienen dentro de sus actividades el aprovechamiento; mientras que Barranquilla verde solo registra dos puntos limpios o plantas de aprovechamiento. Lo anterior es información incoherente entre las fuentes, pero utilizada por efectos académicos.

Las conclusiones derivadas de las entrevistas con algunos gestores de la tabla 5 referencian que, los RCD *en estado de aprovechabilidad*, específicamente los residuos inertes-pétreos se someten generalmente a una trituración, para luego ser usados como material de relleno en adecuación de terrenos o ser revendido y reprocesados como elementos granulares para usarse en la construcción de pavimentos, exactamente en bases y subbases. Se debe resaltar que esta es una iniciativa netamente comercial de cada gestor y no una alternativa de aprovechabilidad promovida por la autoridad ambiental.

Un caso distinto y de éxito encontrado, que no puede quedarse por fuera es la obra *Santorini*, ubicada en la carrera 51 # 95-31 de la constructora ABL Ingeniería & Construcciones quien, al

reconocer tanto material resultante de la demolición en la restauración de esta, asumieron el riesgo y compraron una trituradora de mandíbula, reemplazaron en cierto porcentaje el agregado grueso natural por agregado reciclado y lo usaron para fundir el piso del estacionamiento de la edificación.

Finalmente se tienen interrogantes, ¿Qué sucede con el resto de los materiales que integran los RCD? ¿Hay alternativas innovadoras por implementar para estos residuos dentro del gremio de los gestores y autoridades de control?



**Tabla 5.***Listado de gestores registrados ante la C.R.A.*

<b>Nombre o razón social</b>	<b>Actividad ejecutada por el gestor de RCD</b>	<b>Capacidad de aprovechamiento de RCD del G (t/mes)</b>	<b>Capacidad de disposición final de RCD del G (t/mes)</b>
Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla Triple A S.A E.S.P.	Aprovechamiento	15000	30200
Valores y contratos S.A.	Generador, almacenamiento y aprovechamiento.	1000 t/mes	360000 t/mes
Valores y contratos S.A.	Generador, almacenamiento, aprovechamiento y disposición final.	1000 t/mes	360000 t/mes
Ecogarden S.A.S.	Almacenamiento en punto limpio, aprovechamiento y disposición final.	2.000 t/mes	15.000 t/mes
Grupo rio cedro S.A.S.	Almacenamiento en punto limpio, Aprovechamiento y disposición final.	2000	3000
Ecofinort S.A.S.	Aprovechamiento y disposición final.	1.000(T/MES)	1.000(T/MES)
Unión temporal caribe	Generador, almacenamiento y aprovechamiento.	1000 t/mes	360000 t/mes
<b>Puntos Limpios o Planta de Aprovechamiento autorizados por Barranquilla Verde</b>			
DBA Inversiones América			

---

Royal Ingeniería S.A.S

---

*Nota: Elaboración propia. Fuente (CRA, 2019).*

### Estudio de Mercado.

#### *Análisis de la Demanda.*

Partiendo de la hipótesis que el concreto sostenible suple como mínimo las mismas necesidades técnicas que el concreto convencional, las mejores formas de estimar el comportamiento de la demanda de este producto innovador, es estudiar la demanda hasta la fecha del concreto convencional. Ahora bien, sabiendo que los proyectos civiles son el principal consumidor de concreto en el mercado, es tentador afirmar que la demanda del concreto tendrá una relación directamente con el número de obras civiles en ejecución. Pero no, no se puede acudir a esta relación porque de hecho hasta enero del presente año el DANE identificó una disminución en el número de licencias de construcciones emitida con respecto a los dos años anteriores, como muestra en la figura 31, además, se desconoce la cantidad media de concreto que puede ser adquirida por cada comprador a razón de que la variabilidad entre los proyectos civiles es demasiado alta y asumir un promedio de la cantidad de concreto que podrían demandar sería un dato erróneo.

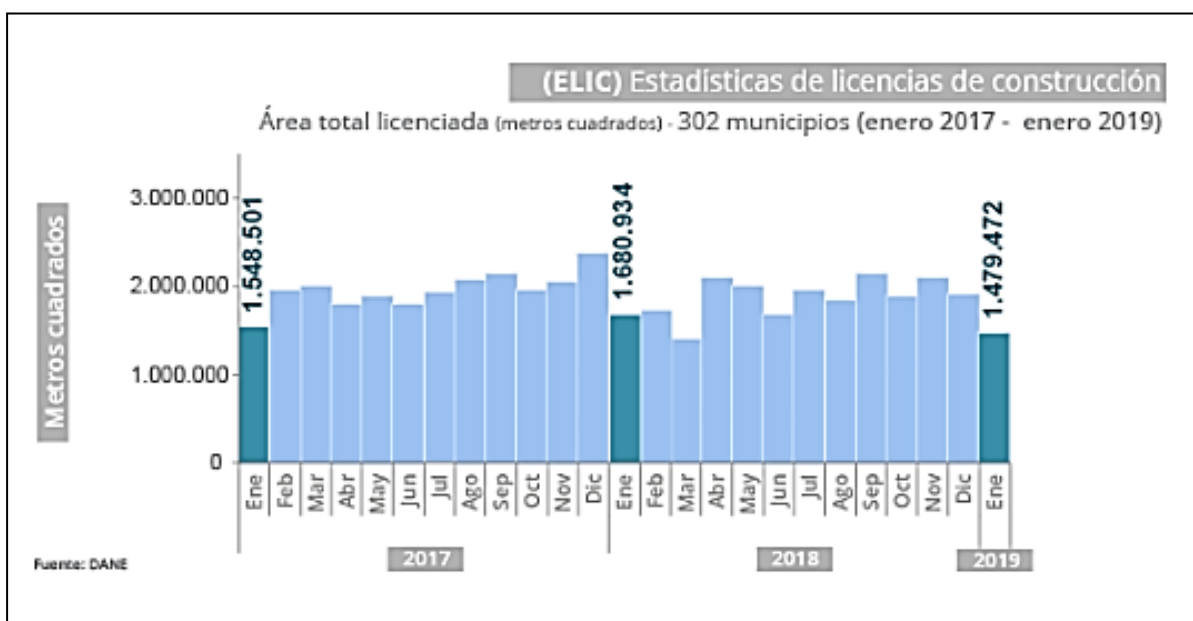


Figura 31. Estadísticas de licencias de construcción enero 2017–enero 2019. Fuente: DANE.

*Segmentos de mercado.*

Según (Gámez García et al., 2017) en la actualidad el concreto es el material más utilizado en la construcción civil, arquitectónica y de edificios. Las condiciones como el costo, las características físico-mecánicas y su durabilidad lo han posicionado como elemento primordial entre sus clientes.

Asimismo, más empresas no solo del sector constructivo han formulado nuevas investigaciones por hacer que el concreto sea sostenible generando que se propongan nuevos diseños de mezcla que incluyan aditivos de distintos orígenes. Y aunque en algunos casos se haya comprobado que esto reduce algunas características mecánicas del concreto, estas novedades por el contrario han sido pie para expandir las funcionalidades y los nuevos usos de este en el mercado que le demande.

Un ejemplo tangible dentro del caso urbano de Barranquilla es IgNeo, un emprendimiento avalado por Colciencias que decidió añadirle al concreto diseño Industrial, es decir, le otorgó forma, textura, color y funcionalidades alternativas, sin dejar de lado la sostenibilidad puesto que para la materia prima principal de sus productos son los residuos pétreos. Bajo este precedente se han producido bancas, bolardos, jardines, letreros e inmobiliario eléctrico y urbano. “El catálogo de productos de esta compañía tiende a crecer y la finalidad de nuestros productos va variando según sea necesario o demandado por los clientes” asegura la gerente general del proyecto en medio de la entrevista.

Por todo lo anterior, hoy en día cualquier compañía que desee innovar en diseño y aplicación de concreto no estructural pertenece al segmento del mercado de esta propuesta sostenible.

*Tamaño de mercado.*

Para enero del presente año según los registros del DANE se entregaron 1.479.472 licencias de construcción, número que es adoptado para pronosticar la cantidad actual de compradores de concreto. Ahora bien, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible a partir del 2018 los grandes y medianos generadores de RCD (construcciones) deben reutilizar sus propios materiales, mínimo en un 3% e incrementando hasta alcanzar un 30% razón legal que sustenta la necesidad de los proyectos civiles de utilizar material reciclado por lo que el concreto sostenible resulta una opción prometedora.

*Análisis de la Oferta.*

Desde el capítulo 2 se tiene claro que los RCD son un compendio de materiales con distintas características, sin embargo, los residuos pétreos específicamente se convierten en el foco de atención puesto que estos al ser reprocesados como elementos granulares se convierten en la materia prima potencial para la fabricación del concreto sostenible.

Al ser un producto netamente innovador en categoría de sostenibilidad se encontró que no tiene competidores directos que coloquen en riesgo el mercado comercial. Pero, probablemente lo que sí represente una amenaza sea la resistencia al cambio o el tiempo de adaptación que tome a los clientes conocer la cadena de valor del residuo de concreto.

Para estudiar cuantitativamente la oferta de estos residuos, se tiene según el diagnóstico de la gestión que aproximadamente el 70% de los generadores encuestados producen más de 24 m<sup>3</sup> de RCD en promedio mensualmente. Con base en lo anterior, sí se realiza una estimación con el

número de obras civiles que se tienen actualmente en la ciudad, se obtiene que las cantidades de residuos que se estarían generando a corto plazo son prometedoras para suplir las demandas temporales de concreto.

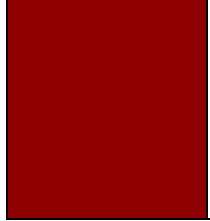
El análisis de la oferta se complementó con un aproximado de la cantidad de RCD que están vertidos públicamente y que seguramente están por fuera de los registros cuantitativos formales. Lo anterior, se logró con ruteos de las calles principales de cada localidad dónde se contabilizaron el número y la estimación de RCD en masa de cada aglomeración de residuos como se muestra en la tabla 6.

Se observa en la figura 32 la división de la ciudad por localidades y la concentración de RCD mostrada según las tonalidades de color, siendo la más oscura el área con mayor incidencia. Significativamente el suroccidente fue la localidad con mayor cantidad de obras civiles de menor tamaño y por lo tanto la zona con mayor vertimiento de RCD en lugares públicos.

**Tabla 6.**

*Recopilación de RCD encontrados en los recorridos realizados según las localidades.*

<b>Localidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Análisis visual</b>
Riomar	Fueron identificados 13 puntos de RCD muy dispersos entre sí a lo largo del mapeo, apilados principalmente en las esquinas de locales con paredes grandes, en sacos dispuestos en la línea de bordillo frente a locales y en una entrada de arqueadores de un edificio residencial.	El RCD predominante fueron restos pétreos, luego láminas de zinc y en dos puntos se encontraron RCD no inertes combinados resaltando la madera, plástico, paneles de superboard, cerámica, perfiles de aluminio.
Metropolitana	A lo largo del recorrido se encontraron 20 puntos, ubicados principalmente en aceras y esquinas de paredillas.	Se identificó como residuo dominante los restos pétreos. Además, se observó un punto con relleno de estos residuos en su propiedad. Por último, se encontró un punto con ladrillo, bloques de cemento y basura.
Norte Centro Histórico	33 puntos se identificaron a lo largo del trayecto, ubicados principalmente de las aceras, boulevard y frentes de edificios.	En este sector predominaron los restos pétreos en zonas donde se encontraban combinados con residuos sólidos. Luego, se encontraron los residuos de las obras de canalización a la altura de la calle 58 con carrera 54 (etapas de mobiliario urbano). Y menos de tres veces se encontraron RCD no inertes como PVC, láminas de zinc y perfiles de aluminio. Además, se identificó un botadero a cielo abierto en la zona de campo alegre.
Suroriente	Se encontraron 41 puntos de RCD distribuidos a lo largo del recorrido, ubicados principalmente en aceras, esquinas de paredillas, en los alrededores de canchas y parques.	Los residuos más predominantes fueron los productos de concreto, mortero, bloques de cemento, ladrillo rojo y movimiento de tierra debidos a arreglos en las vías o alcantarillado. Además, se identificó un botadero en el barrio el Atlántico.
Suroccidente	En esta localidad la cifra es alarmante, fueron 47 puntos de RCD encontrados a lo largo de la ruta, principalmente las zonas periféricas de las casas residenciales, alrededores del cementerio Calancala y sobre las calles, pero este último debido a arreglos locales en la vía.	Se encontró que aproximadamente la mitad de los RCD identificados tienen como función rellenar el terreno desnivelado de las casas de los barrios entre Evaristo Sourdis y el Por fin, siendo estos residuos en su mayoría pétreos e inertes de material fino. También se encontraron residuos en sacos dispuestos en el borde de la línea de propiedad de



casas. Y, además se identificaron dos botaderos a cielo abierto en zonas opuestas.

*Nota: autoría propia.*



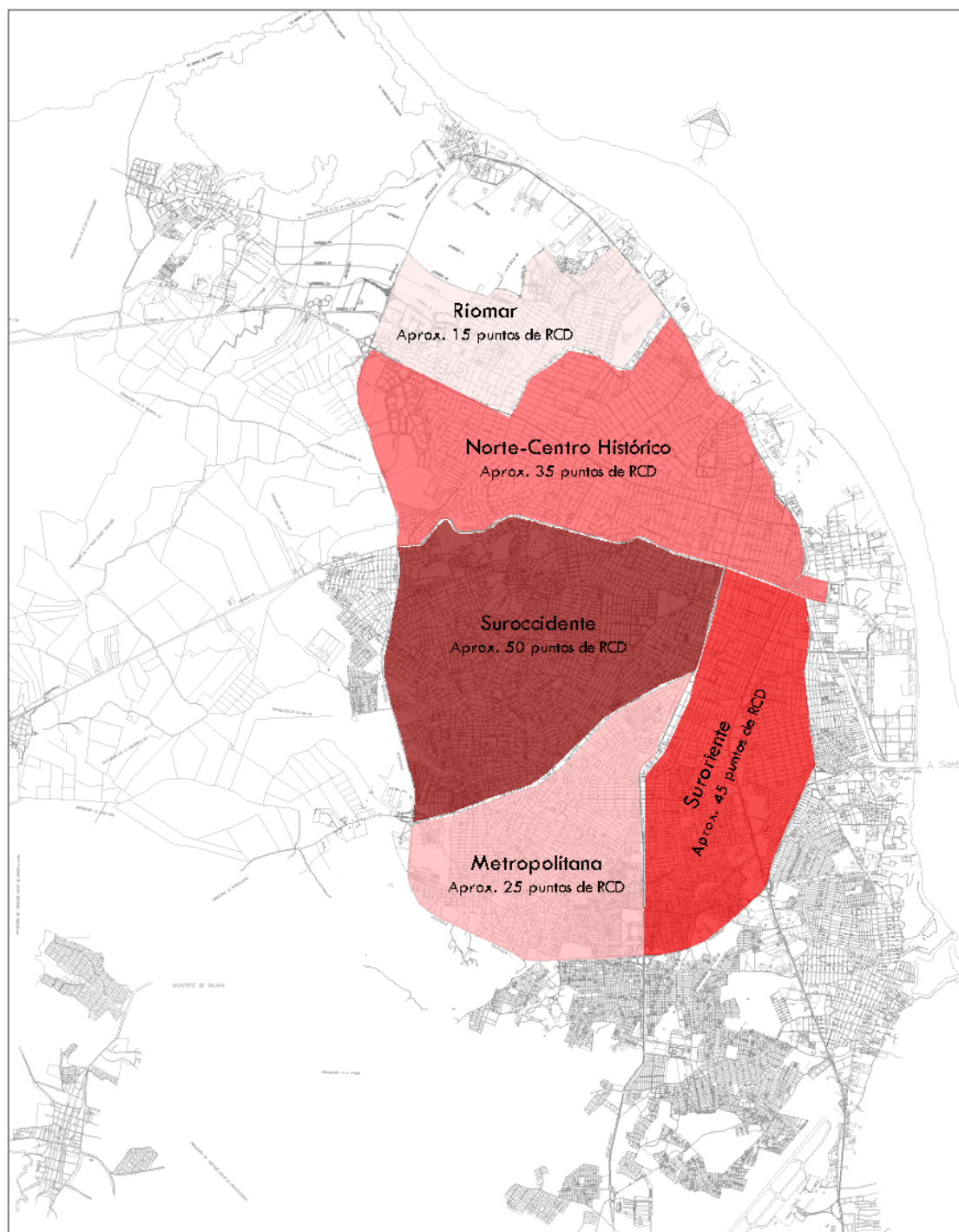


Figura 32. Representación gráfica de los RCD encontrados en Barranquilla. Elaboración propia.

**Viabilidad técnica**

La figura 33 se representa un flujograma donde se encuentra los resultados de todo el proceso industrial realizado para la obtención de los agregados gruesos reciclados (AGR).

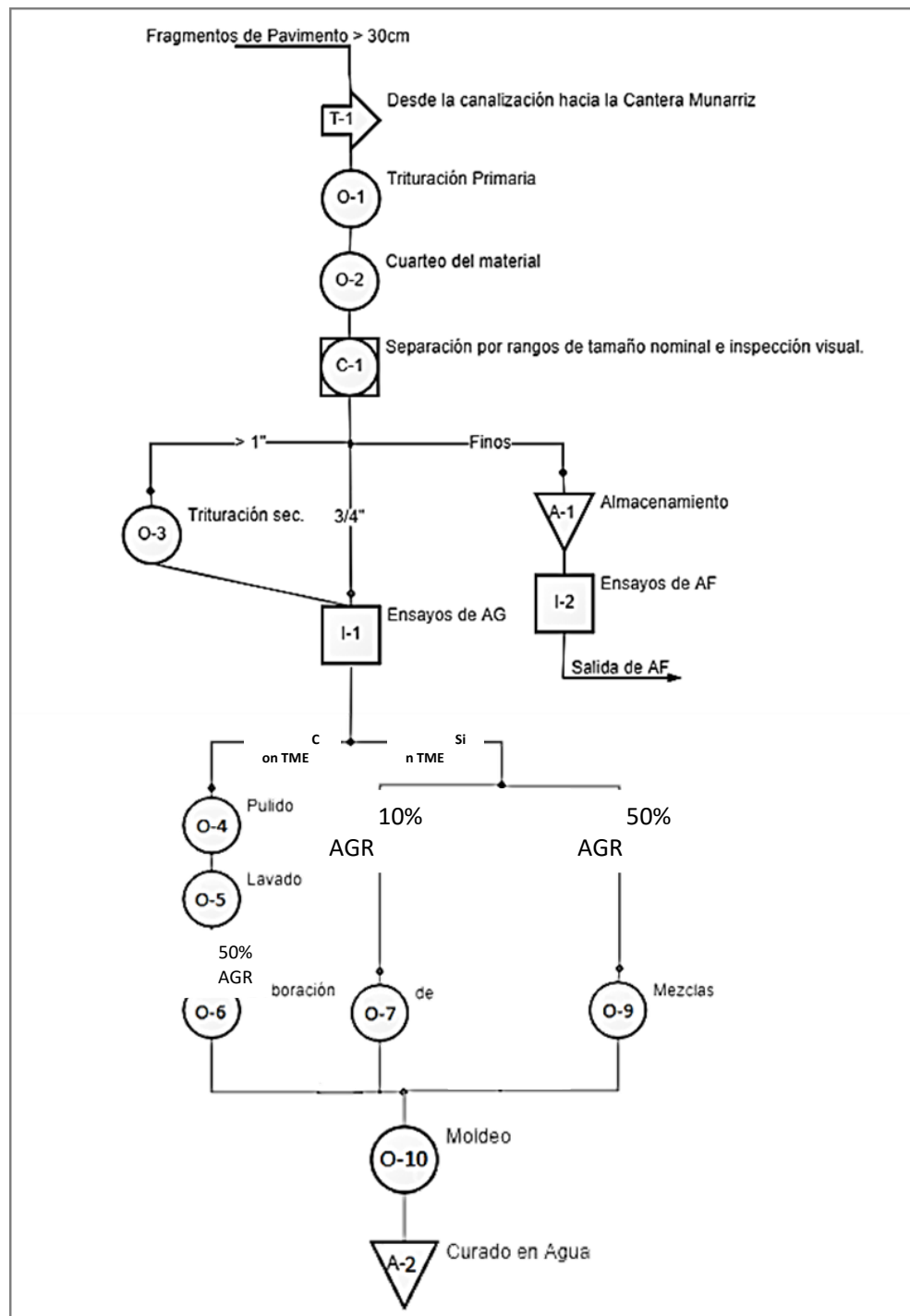


Figura 33. Flujograma del proceso industrial realizado para obtener los AGR. Elaboración propia.

### Propiedades de los agregados utilizados.

Con el fin de validar la posibilidad de usar los residuos de concreto (de pavimento rígido) como agregados reciclados, se realizó una caracterización física-mecánica a través de los ensayos de la tabla 3 establecidos por la NTC 174 “Especificaciones de los agregados para concreto”, obteniendo los siguientes resultados:

### ***Granulometría***

#### ***Agregado reciclado.***

Una vez triturado el residuo de concreto siguiendo el flujograma de la figura 35, se procedió a hacer el cuarteo del material resultante (ver figura 34) para realizar la gradación respectiva de acuerdo a la NTC 77.



*Figura 34.* Cuarteo del agregado reciclado. Fuente propia.

Para determinar si el agregado reciclado en estudio cumple o no con la normativa, se compara su curva granulométrica con los límites de gradación establecido por la NTC 174 tanto para agregado grueso como agregado fino. Los resultados se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7.***Granulometría del agregado reciclado a partir del residuo de concreto.*

<b>Granulometría Agregado Reciclado</b>					
<b>Tamiz</b>	<b>Designación en mm</b>	<b>Peso Retenido (g)</b>	<b>Porcentaje Retenido</b>	<b>Porcentaje retenido Acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
2"	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
1 1/2"	37,5	65	0,98%	0,98%	99,02%
1"	25	849	12,84%	13,82%	86,18%
3/4"	19	1193	18,04%	31,87%	68,13%
1/2"	12,5	1553	23,49%	55,35%	44,65%
3/8"	9,5	495	7,49%	62,84%	37,16%
<b>N°4</b>	<b>4,75</b>	<b>889</b>	<b>13,45%</b>	<b>76,29%</b>	<b>23,71%</b>
N°8	2,36	635	9,60%	85,89%	14,11%
N°16	1,18	327	4,95%	90,83%	9,17%
N°30	0,6	204	3,09%	93,92%	6,08%
N°50	0,3	214	3,24%	97,16%	2,84%
N°100	0,15	120	1,81%	98,97%	1,03%
<b>N°200</b>	<b>0,075</b>	<b>46</b>	<b>0,70%</b>	<b>99,67%</b>	<b>0,33%</b>
Fondo		22	0,33%	100,00%	0,00%
<b>Muestra total (g)</b>		<b>6612</b>			

*Nota: autoría propia.*

La distribución granulométrica del agregado grueso reciclado (AGR) cumple en gran medida con la normativa colombiana como se puede observar más adelante en la figura 36. Sin embargo, el agregado fino reciclado (AFR) no cumple en absoluto con los límites que la norma establece (ver figura 35), por lo que presenta más porcentaje de finos, siguiendo el comportamiento descrito en la literatura revisada y haciendo difícil su uso para la fabricación de concreto.

Cabe resaltar que AGR cumple con el porcentaje admisible del material que pasa el tamiz No. 200 (0,075mm), es decir, menos de 1.0%, requisito descrito en la tabla 3 de la NT 174.

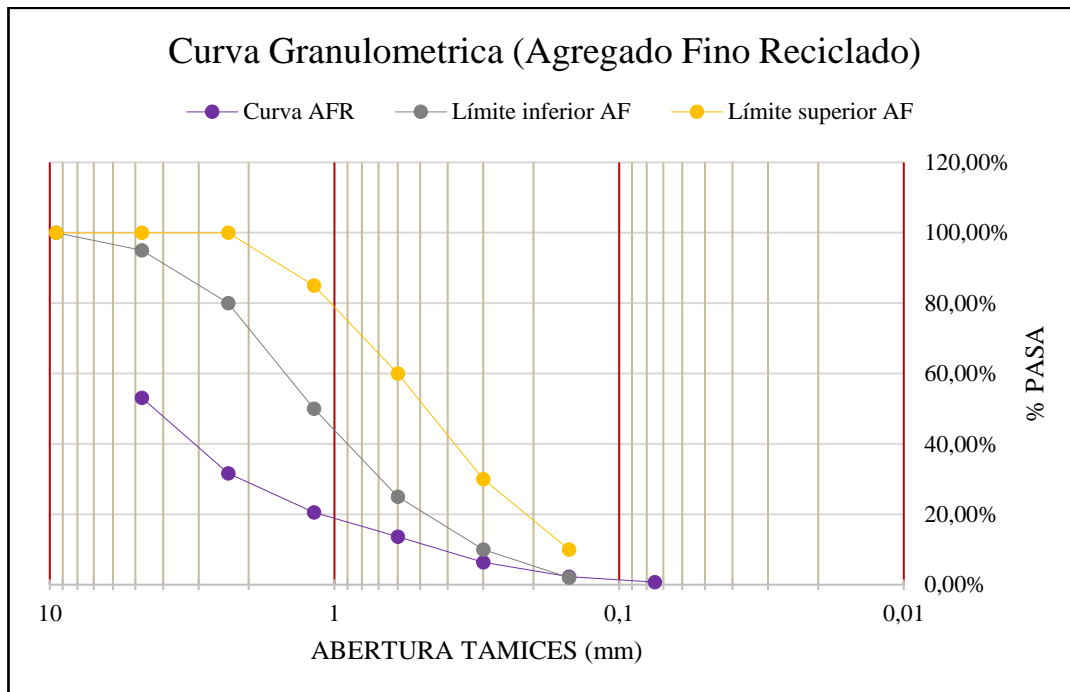


Figura 35. Curva granulométrica del agregado grueso reciclado junto con los límites establecidos por la NTC 174.

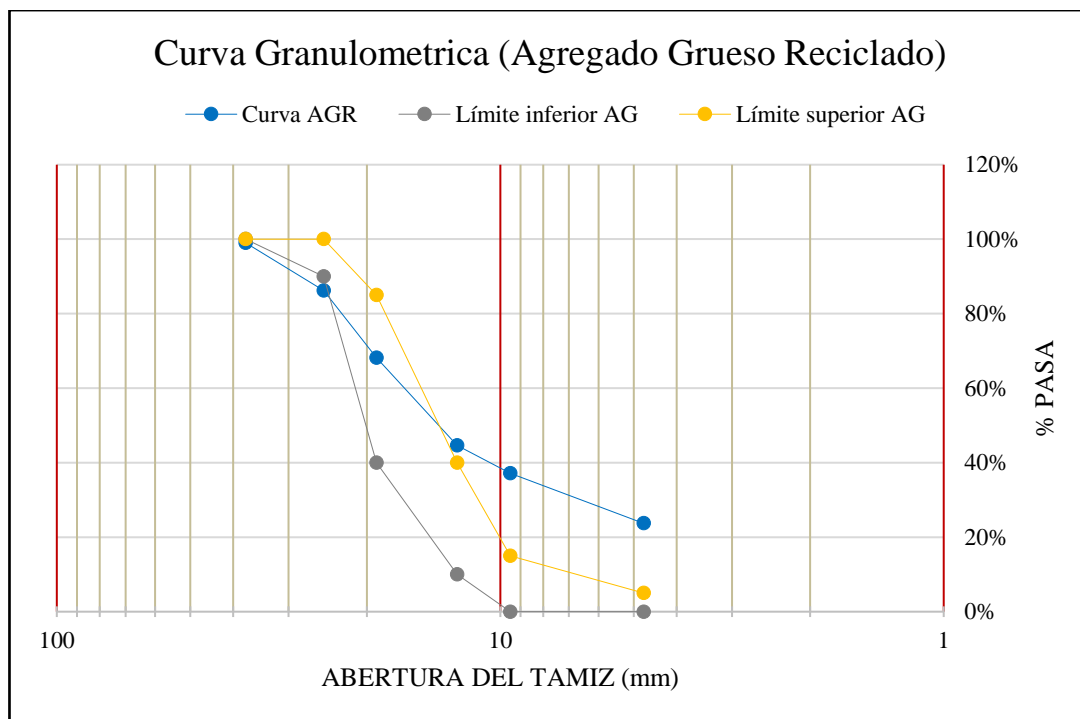


Figura 36. Curva granulométrica del agregado fino reciclado junto con los límites establecidos por la NTC 174.

*Agregados naturales.*

Por otro lado, se compara la gradación de los agregados reciclados vs los agregados naturales utilizados para esta investigación, junto con los límites respectivos que la norma establece. En las tablas 8 y 9 junto con sus respectivas gráficas (figura 37 y 38), se muestra la información de los ensayos de granulometría realizados a cada uno de los agregados naturales.

Tabla 8.

*Granulometría del agregado grueso natural.*

<b>Granulometría Agregado Grueso Natural</b>					
<b>Tamiz</b>	<b>Designación en mm</b>	<b>Peso Retenido (g)</b>	<b>Porcentaje Retenido</b>	<b>Porcentaje retenido Acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
2"	50,8	0	0,00%	0,00%	100,00%
1 1/2"	37,5	0	0,00%	0,00%	100,00%
1"	25	0	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19	455	8,73%	8,73%	91,27%
1/2"	12,5	1824	35,02%	43,75%	56,25%
3/8"	9,5	1427	27,39%	71,15%	28,85%
<b>N°4</b>	<b>4,75</b>	<b>1440</b>	<b>27,64%</b>	<b>98,79%</b>	<b>1,21%</b>
N°8	2,36	55	1,06%	99,85%	0,15%
Fondo		8	0,15%	100,00%	0,00%
<b>Muestra total (g)</b>		<b>5209</b>			

*Nota: autoría propia.*

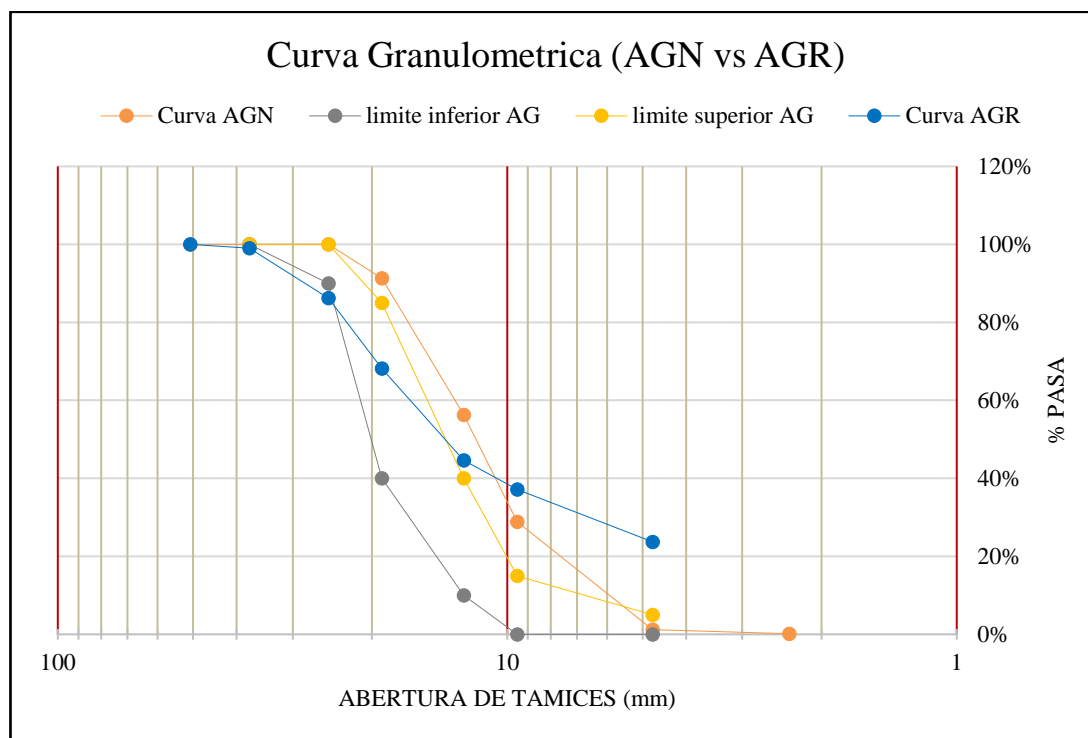


Figura 37. Comparación de la curva granulométrica del AGN vs AGR y límites de gradación de la NTC 174.

**Tabla 9.**

*Granulometría del agregado fino natural.*

Granulometría Agregado Fino Natural					
Tamiz	Designación en mm	Peso Retenido (g)	Porcentaje Retenido	Porcentaje retenido Acumulado	% Pasa
3/8"	9,5	0	0,00%	0,00%	100,00%
Nº4	4,75	0	0,00%	0,00%	100,00%
Nº8	2,36	110	22,65%	22,65%	77,35%
Nº16	1,18	71	14,62%	37,27%	62,73%
Nº30	0,6	80	16,47%	53,74%	46,26%
Nº50	0,3	152,4	31,38%	85,11%	14,89%
Nº100	0,15	65,1	13,40%	98,52%	1,48%
Nº200	0,075	4,76	0,98%	99,50%	0,50%
Fondo		2,44	0,50%	100,00%	0,00%
Muestra total (g)		485,7			
Módulo de finura = 2,97					

*Nota: autoría propia.*



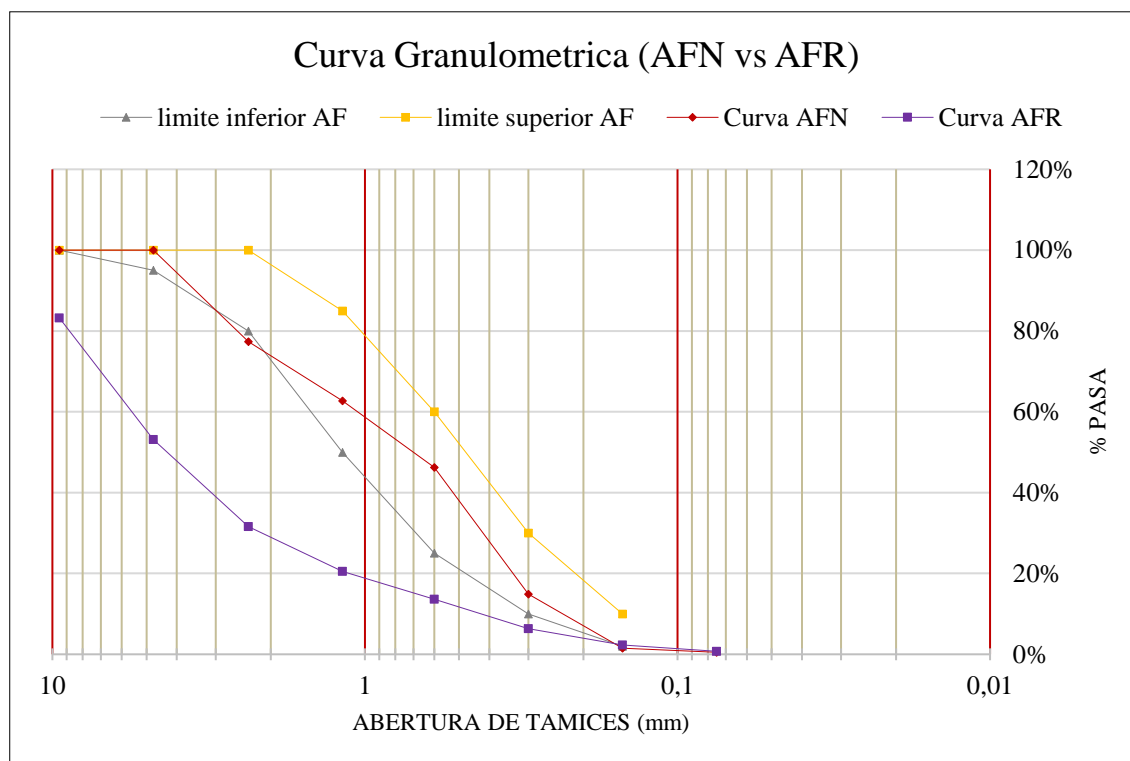


Figura 38. Comparación de la curva granulométrica del AFN vs AFR y límites de gradación de la NTC 174.

De los resultados anteriores se observa que de los agregados naturales utilizados solo la arena cumple con los límites establecidos por la normativa, mientras que la grava supera los límites establecidos por la norma, sin embargo, al ser un producto de las canteras de Argos y comercializados ampliamente en el sector constructivo de la zona norte de Colombia, se adopta la opción de seguir trabajando con este agregado. Por otro lado, en los agregados reciclados solo el grueso (AGR) cumple en gran medida con la NTC haciendo viable su reutilización como agregado en las mezclas de concreto.

*Agregado grueso reciclado con TME.*

Se analizó una cantidad aproximada de 38kg con la técnica de mejoramiento experimental (TME) mencionada en el capítulo 4. Los resultados se señalan a continuación:

Se evidenció una reducción de la cantidad del AGR en masa del 9.2%, deduciendo así que 3,48kg correspondían a una combinación de mortero residual y material fino indeseado.

La figura 39 representa el comportamiento granulométrico consignado en la tabla 10 y se puede confirmar que los AGR con esta técnica de mejoramiento propuesta incrementa la calidad de la gradación de las partículas, logrando cumplir con los límites establecidos por la NTC 174.

**Tabla 10.**

*Granulometría del AGR con técnica de mejoramiento experimental.*

<b>Granulometría AGR con técnica de mejoramiento experimental</b>					
<b>Tamiz</b>	<b>Designación en mm</b>	<b>Peso Retenido (g)</b>	<b>Porcentaje Retenido</b>	<b>Porcentaje retenido Acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
1 1/2"	37,5	0	0,00%	0,00%	100,00%
1"	25	232	4,73%	4,73%	95,27%
3/4"	19	1338	27,30%	32,03%	67,97%
1/2"	12,5	1766	36,03%	68,07%	31,93%
3/8"	9,5	635	12,96%	81,02%	18,98%
N°4	4,75	812	16,57%	97,59%	2,41%
Fondo		118	2,41%	100,00%	0,00%
<b>Muestra total (g)</b>		<b>4901</b>			

*Nota: autoría propia.*

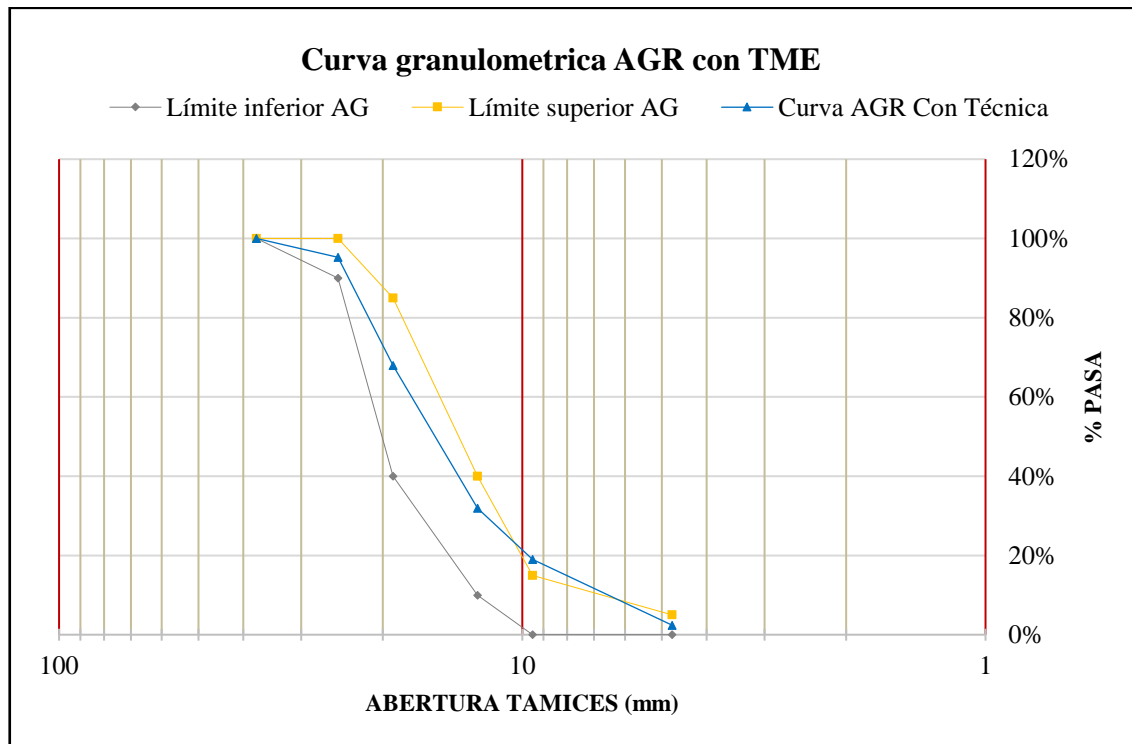


Figura 39. Curva granulométrica AGR con técnica de mejoramiento experimental y límites de gradación de la NTC 174.

### ***Propiedades físicas.***

Continuando con el análisis de los agregados, se aplicaron los ensayos necesarios para saber las propiedades físico-mecánicas descritas en la tabla 3. Cabe resaltar que de los AR solo se ensayaron los AGR por lo que estos áridos es el objeto de estudio, además de cumplir en un porcentaje aceptable con la gradación planteada en la NTC 174. Se presenta una comparación de la masa unitaria y porcentaje de vacíos, densidades, absorción y humedad entre los diferentes tipos de agregados gruesos (ver figura 40, 41, 42 y 43 respectivamente).

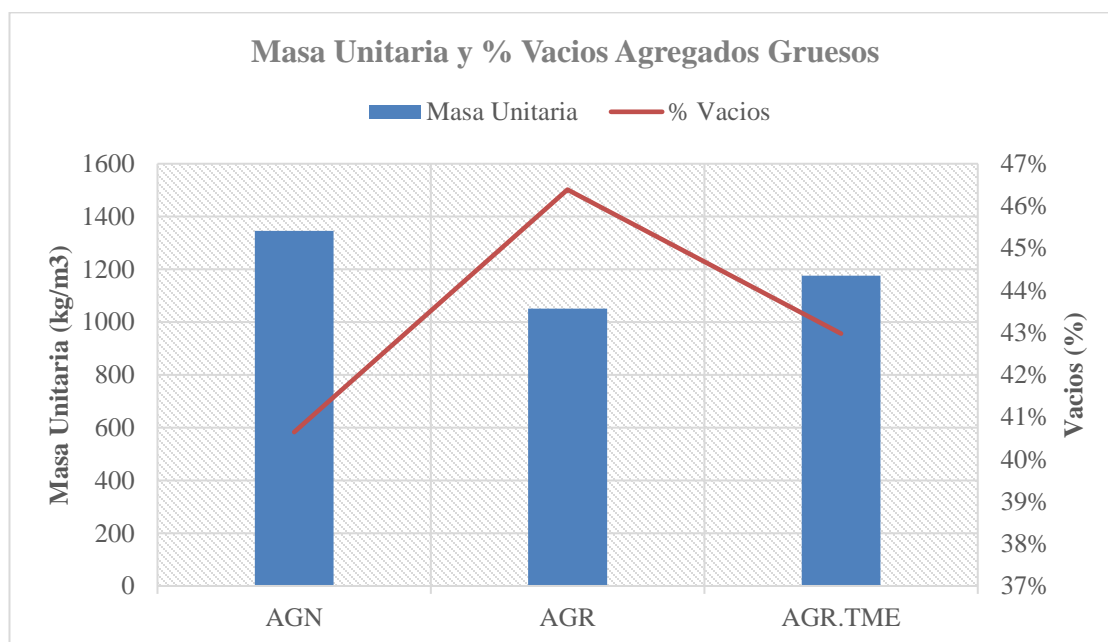
*Masa unitaria compactada y porcentaje de vacíos.*

Figura 40. Comparación gráfica de la masa unitaria y % de vacíos entre los AGN – AGR y AGR con TME.

Se observa que el AGN contiene una mayor cantidad de masa por unidad de volumen en comparación con los otros dos materiales. También se evidencia que el AGR con TME presenta un aumento del 10,71% de esta propiedad con respecto al AGR; lo cual confirma que la técnica ayuda a mejorar la utilización del AGR en términos comerciales puesto que es más provechoso y rentable. En consecuencia, el porcentaje de vacíos del AGR es 6 y 3% mayor con respecto al AGN y AGR con TME respectivamente. Asimismo, el 2% de diferencia entre el AGR y AGR con TME evidencia el mejoramiento de la gradación de sus partículas.

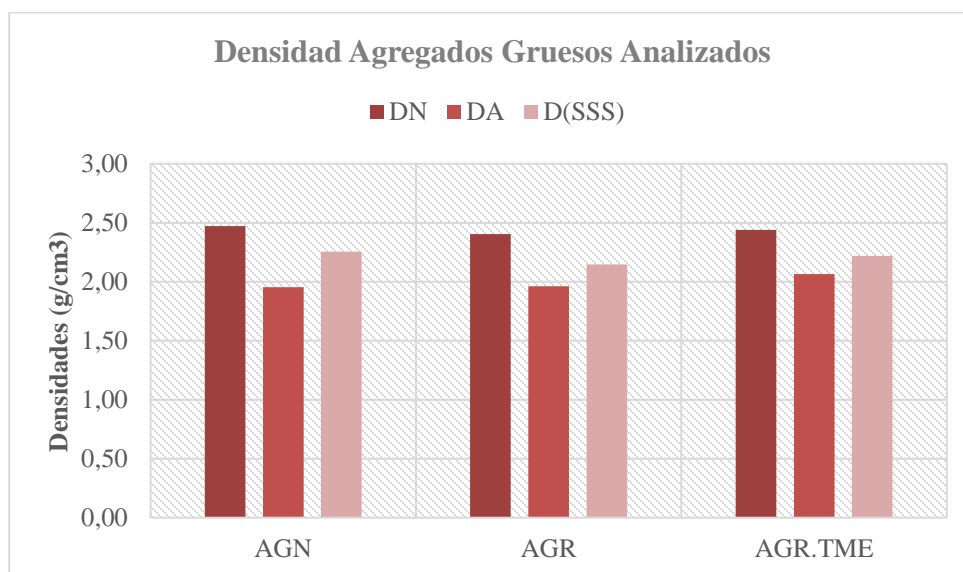
*Densidad y absorción*

Figura 41. Densidades de los agregados gruesos analizados. Elaboración propia.

Para los materiales ensayados en esta investigación, las densidades de los agregados gruesos reciclados con respecto al AGN varían entre el 0,44 y 5%, mostrando un comportamiento muy similar al del árido natural utilizado.

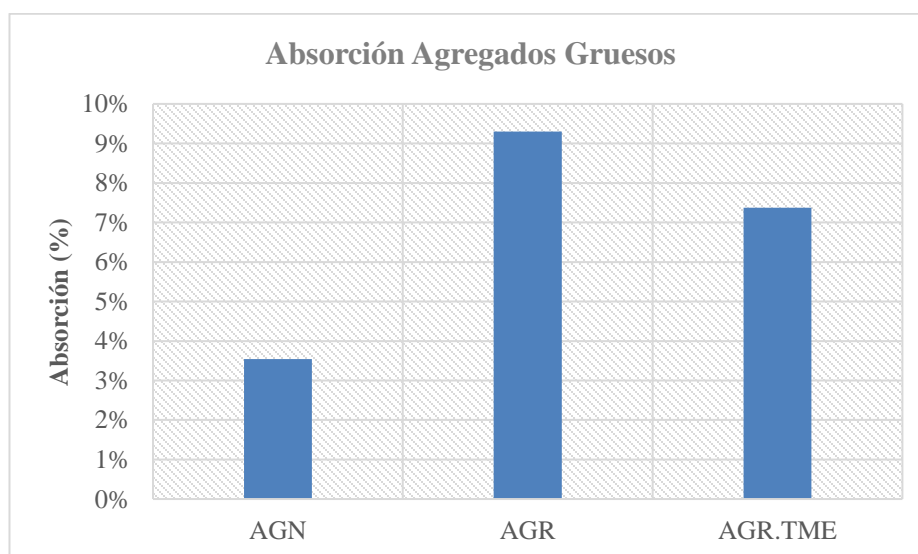


Figura 42. Absorción de los agregados gruesos. Elaboración propia.

Al observar los porcentajes de absorción de los agregados gruesos se puede decir que el AGR contiene una gran cantidad de poros a la intemperie a diferencia del AGN, haciendo que estos se llenen con mayor facilidad al momento que entren en contacto con el agua.

Por consiguiente, los datos de la absorción muestran un aumento significativo entre el AGR sin TME y el AGN del 262% aproximadamente; esto modifica las proporciones iniciales del agua de mezclado. En contraparte, se observa que el AGR con TME aumenta su porcentaje de absorción en un 208% con respecto al AGN, reduciendo en un 20,61% esta diferencia.

#### *Humedad*

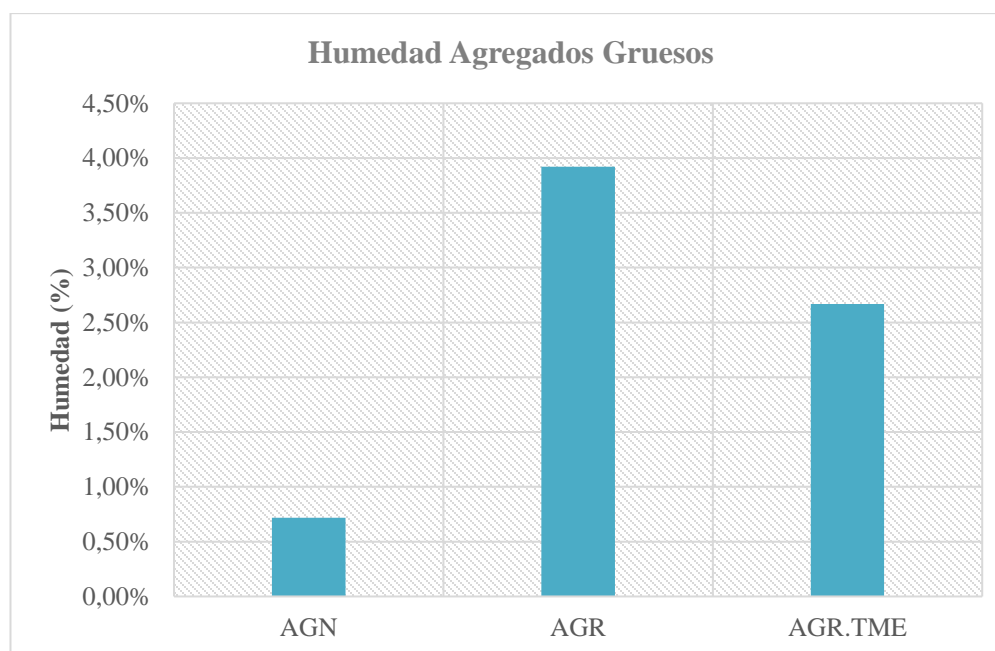


Figura 43. Humedad de los agregados gruesos. Elaboración propia.

Siguiendo con el análisis de los agregados, es lógico el comportamiento del contenido de humedad del AGR presentado en la figura 43. El aumento es de aproximadamente

551,38% con respecto al AGN. Aunque este contenido de humedad se reduce con la TME, en aproximadamente un 32,75%.

En resumen, conforme a los resultados mostrados en las figuras anteriores se puede determinar que la TME implementada en esta investigación cumple de manera satisfactoria con el objetivo general de este, el cual es mejorar las propiedades físicas del AGR en orden de cumplir con lo establecido por las normativas. Además, cualitativamente hablando, se presenció un cambio significativo en la forma del AGR, específicamente en las aristas angulosas a causa del proceso propio de trituración. En la figura 44 se muestra una comparación visual del AGR sin TME versus AGR con TME. Por ende, se determina según los resultados hallados, que esta técnica experimental logra mejorar significativamente las propiedades físicas del AGR.



*Figura 44.* Comparación visual del AGR con y sin técnica respectivamente. Fuente propia.

*Propiedad mecánica del AGR: resistencia al desgaste.*

El procedimiento se siguió conforme a lo descrito en la norma INVE 218 – 07. La gradación seleccionada fue la A de la tabla 2 de la norma. La muestra seca antes del ensayo fue de 5,00 kg y la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz No. 12 = 3,06 kg obteniendo que:

$$\%Desgaste_{AGR} = 38,8\%$$

Comparando el resultado con la NTC 174, se concluye que el agregado grueso reciclado en estudio cumple con el límite de abrasión establecido en la tabla 3 de la norma en mención, siendo  $38,8\% < 50\%$ .

A continuación, se presenta el resumen final de las propiedades analizadas para cada agregado:

**Tabla 11.***Resumen de la caracterización físico-mecánica de los agregados.*

<b>Propiedad</b>	<b>AGN TME</b>	<b>AGR</b>	<b>AGR con TME</b>	<b>AFN</b>
Módulo de finura	NA	NA	NA	2.97
Masa unitaria compactada	1346 kg/m <sup>3</sup>	1050 kg/m <sup>3</sup>	1176 kg/m <sup>3</sup>	1082 kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de vacíos	41%	46%	43%	45%
Densidad nominal	2,47 g/cm <sup>3</sup>	2,40 g/cm <sup>3</sup>	2,44 g/cm <sup>3</sup>	2,50 g/cm <sup>3</sup>
Absorción	3,55%	9,3%	7,37%	1,8%
Humedad	0,72%	3,97%	2,67%	1,83%
Desgaste	No se realizó	39%	No se realizó	NA
Forma	Redondeada	Cúbica con ángulos pronunciados	Cúbica con caras redondeadas.	Intermedia a gruesa

*Nota: autoría propia.*



**Diseño de mezclas.**

Los datos seleccionados para estimar la dosificación necesaria para la elaboración de las cinco mezclas, teniendo en cuenta las condiciones establecidas y halladas anteriormente, se presentan a continuación:

**Tabla 12.***Datos para la dosificación teórica de concreto.*

Proceso de diseño	Dato seleccionado	Referencia
1. Asentamiento seleccionado	7,5 cm	Tabla 9-6 [1]
2. TMN seleccionado	$\frac{3}{4}$ " (19mm)	Tabla 11.4 [2]
3. Contenido de aire estimado	2%	Tabla 9-5 [1]
4. Agua de mezclado estimado	203 kg/m <sup>3</sup>	
5. Resistencia de diseño determinada	$f'_c = 30MPa$ $f'_{cr} = 38,3MPa$	Tabla C. 5.3.2.2 de la NSR-10
6. Relación de Agua cemento (a/c) seleccionada	0,445	Tabla 9-3 [1]
7. Contenido de cemento calculado	456 kg/m <sup>3</sup>	$C = \frac{A}{a/c}$
8. Proporciones de los agregados estimados		
b/b <sub>o</sub>	0,61	Tabla 11.15 [2]
Peso seco del AGN	821 kg/m <sup>3</sup>	$P_s = (b/b_o) * (Mc)$
Volumen absoluto del AGN	821 kg/m <sup>3</sup>	$V_a = P_s/D_N$

## 9. Diseño en condiciones secas

<b>Ingredientes</b>	<b>Peso seco (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad Nominal (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen absoluto (l/m<sup>3</sup>)</b>
Cemento	456	3,1	147
Agua	203	1	203
Agregado grueso natural	821	2,47	332
Agregado fino natural	794	2,50	318
<b>TOTAL</b>	<b>2274</b>		<b>1000</b>

## 10. Ajustes por humedad

<b>Agregado</b>	<b>Peso húmedo (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>Agua efectiva (kg/m<sup>3</sup>)</b>
AGN	827	29,11	5,89	226
AFN	818	14,30	23,83	193
				210

$$P_h = P_s * (1 + w\%/100)$$

$$L_1 = (peso\ seco)(A\%)$$

$$L_2 = (peso\ seco)(w\%)$$

$$A_{ef} = agua\ de\ diseño + L_1 - L_2$$

11. Resumen del diseño teórico para fabricar 1m<sup>3</sup>.

<b>Materiales</b>	<b>Por Peso</b>		<b>Relación</b>
	<b>Seco (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Húmedo (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
Agua	203	210	0,45
Cemento	456	472	1
Grueso	821	827	1,76
Fino	794	818	2

*Nota: autoría propia: [1] Committe ACI 211, 2002. [2] Sánchez Diego, 1996.*

Ahora bien, con base al diseño teórico resultante mostrado en el ítem 11 de la tabla anterior, se estimó la dosificación necesaria para la elaboración de la mezcla de control (totalmente agregados naturales) y las cuatro mezclas con porcentaje de reemplazo en volumen del AGN por AGR. En la siguiente tabla se resume la información:

**Tabla 13.***Dosificación teórica de las mezclas propuestas.*

<b>Componente</b>	<b>Control</b>	<b>AGR-10</b>	<b>AGR-50 sin TME</b>	<b>AGR-50 con TME</b>
	<b>(kg)</b>	<b>(kg)</b>	<b>(kg)</b>	<b>(kg)</b>
Agua	7,41	7,41	7,41	7,41
Cemento	16,65	16,65	16,65	16,65
Fino	28,87	28,87	28,87	28,87
<b>AGN</b>	<b>29,19</b>	<b>26,27</b>	<b>14,59</b>	<b>14,59</b>
<b>AGR</b>	<b>0,00</b>	<b>2,84</b>	<b>14,19</b>	<b>14,40</b>

*Nota: autoría propia.*

Siguiendo la metodología de ensayo y error de la ACI, se ajustó las cantidades necesarias de pasta de cemento para alcanzar el asentamiento seleccionado, pero manteniendo siempre la relación a/c. Por consiguiente, en la tabla 14 se muestran los datos reales definitivos utilizados para cada uno de los tipos de mezcla.

Se puede resaltar que, en las mezclas con porcentaje de AGR se evidencia un aumento en el contenido de pasta de cemento a pesar de tener la misma relación a/c, esto debido a que la manejabilidad de las mezclas se vio afectada por las propiedades físicas del AGR.

**Tabla 14.***Dosificación definitiva con ajustes.*

<b>Componente</b>	<b>Control (kg)</b>	<b>AGR-10 (kg)</b>	<b>AGR-50 sin TME (kg)</b>	<b>AGR-50 con TME (kg)</b>
<i>Agua</i>	<i>7,41</i>	<i>8,03</i>	<i>8,03</i>	<i>9,03</i>
<i>Cemento</i>	<i>16,65</i>	<i>18,05</i>	<i>18,05</i>	<i>20,30</i>
<i>Fino</i>	<i>28,87</i>	<i>28,87</i>	<i>28,87</i>	<i>28,87</i>
<b>AGN</b>	<b>29,19</b>	<b>26,27</b>	<b>14,59</b>	<b>14,59</b>
<b>AGR</b>	<b>0,00</b>	<b>2,84</b>	<b>14,19</b>	<b>14,40</b>
<i>a/c</i>	0,445	0,445	0,445	0,445
<i>Asentamiento</i>	70 mm	70 mm	75 mm	77 mm
T ambiente	28°C	27°C	28°C	29°C
% Humedad	71%	67%	82%	84%
Sensación Térmica	32°C	29°C	28°C	29°C

*Nota: autoría propia*

Adicionalmente, la mezcla de 50% con TME requirió mucho más consumo de pasta de cemento, esto se puede atribuir a que los datos obtenidos por las características físicas de este AGR con TME no fueron suficientes para establecer una tendencia estadística que permitiese conseguir información más representativa y confiable, debido a que se realizaron los ensayos de los agregados una sola vez durante el desarrollo experimental.

**Resistencia a la compresión.**

Las propiedades del concreto endurecido fueron analizadas con base a los resultados del ensayo de la resistencia a compresión a los 28 días.

**Tabla 15.**

*Registro de la resistencia a la compresión 28 días.*

Resistencia especificada 30 MPa				
No. Probeta	Tipo de Mezcla	Resistencia 28 días (MPa)	Prueba promedio de 3 ensayos (MPa)	Porcentaje de resistencia alcanzada
1	Control	17,443	22,880	76%
2		27,457		
3		23,738		
4		19,232		
5		19,962		
6		10,964		
7	AGR-10	19,856	18,871	63%
8		16,112		
9		20,644		
10		20,555		
11		13,627		
12		22,250		
19	AGR-50 sin TME	19,540	19,522	65%
20		18,880		
21		20,146		
22		20,276		
23		18,341		
24		17,791		
25	AGR-50 con TME	21,117	21,391	71%
26		21,241		
27		21,814		
28		22,880		
29		16,733		
30		13,558		

*Nota: Elaboración propia. Un ensayo de resistencia debe ser el promedio de las resistencias de al menos tres probetas de 100x200mm, preparadas de la misma muestra de concreto y ensayadas a 28 días Fuente (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).*

En la tabla anterior se observa que las resistencias obtenidas no alcanzan la resistencia especificada de 30 MPa; esto se puede atribuir a que no se tenía la cantidad de datos suficientes para realizar un análisis estadístico del comportamiento de los AGR utilizados para la fabricación de los concretos. Por lo que el método de diseño de mezcla debería ser ajustado para los materiales usados.

No obstante, con el fin de continuar con la evaluación técnica y saber si es factible la fabricación de concreto en un ámbito no estructural, se compararon las resistencias alcanzadas entre la mezcla patrón partiendo de los parámetros establecidos de control (asentamiento y a/c) para así determinar de manera aproximada, la influencia que tiene los agregados gruesos reciclados en la incorporación de mezclas de concreto bajo métodos convencionales.

A continuación, se muestra las resistencias promedio alcanzadas para cada uno de los tipos de mezclas realizados mostrados en la tabla 16 y graficados en la figura 45.

**Tabla 16.**

*Resistencias a la compresión promedios.*

<b>Resistencia Promedio</b>	<b>Control</b>	<b>AGR-10</b>	<b>AGR-50 sin TME</b>	<b>AGR-50 con TME</b>
(MPa)	21	18,77	19,42	20
(psi)	3045	2722	2816	2900

*Nota: autoría propia.*

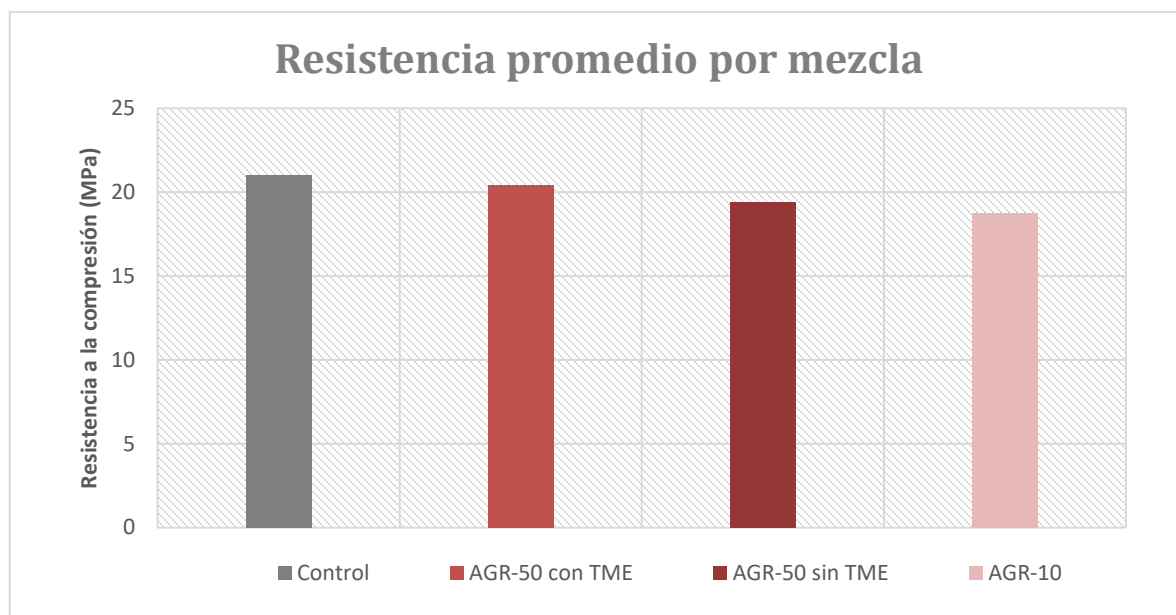


Figura 45. Resistencia promedio por tipo de mezcla. Elaboración propia.

Por medio de lo anterior, se logra establecer que el concreto de AGR-50% con TME es el que mejor se comporta entre las mezclas con porcentaje de AGR, alcanzando un 97% de resistencia en función de la mezcla de control. Aunque este consumió 22% más cemento que la mezcla de patrón, prediciendo una desventaja económica.

Luego con 92 y 89% de resistencia alcanzada continúan las mezclas de AGR-50 sin TME y AGR-10 respectivamente.

Por otro lado, se realizó una revisión visual de las probetas falladas logrando encontrar presencia de este material fino en las mezclas con AGR no tratado, contribuyendo en la disminución de las resistencias obtenidas.

Conforme a esta revisión, se deduce que la decisión de buscar una forma de mejorar el agregado grueso reciclado fue acertada, puesto que así se logra evitar las partículas finas indeseadas que afectan la relación a/c y por ende la resistencia a la compresión.

De manera general las probetas presentaron fallas acordes a lo establecido en la figura 2 de la NTC 673; los agregados estuvieron bien distribuidos a lo largo del molde, y la matriz de pasta de cemento se notó bien hidratada, difícil de desmoronar.

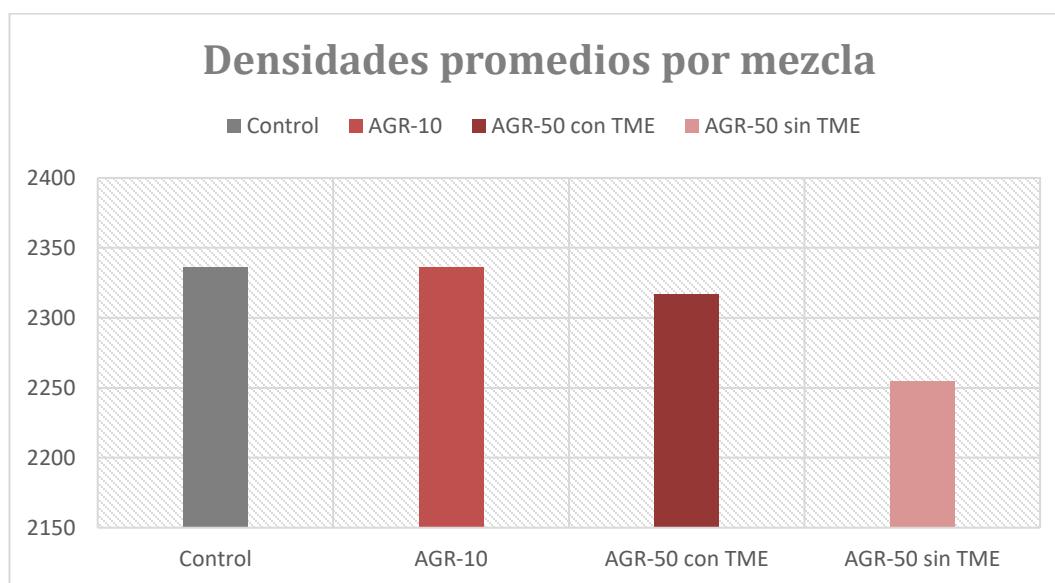


Figura 46. Densidades promedio por tipo de mezclas. Elaboración propia.

Por último, la densidad de los especímenes se muestra en la figura 46, donde se representan los resultados promedios obtenidos y como era de esperarse ningún promedio de las densidades de agregado reciclado superó al promedio de la probeta de control, demostrando que los AGR son más liviano que los AGN, aunque sea una diferencia muy minina, en conjunto con los demás componentes del concreto se hace más notorio.



*Comparación con otros autores.*

Para concluir se compara la diferencia porcentual de las resistencias obtenidas entre las mezclas con AGR y la de control, esto con el fin de tener una perspectiva más amplia de los resultados antes mostrados.

**Tabla 17.***Comparación literaria de los resultados de compresión.*

<b>Autores</b>	<b>% de diferencias en la resistencia con respecto a la de control</b>		
	<b>≥10%</b>	<b>30%</b>	<b>≤50%</b>
Porcentaje de reemplazo			
(Gámez García et al., 2017)	-5%	-5%	-10%
(Gutiérrez Moreno, Mungaray Moctezuma, & Hallack Alegría, 2015)	NR	6%	NR
(Agrega Sotelo & Moncada Moreno, 2015)	-17%	NR	-11%
Este Proyecto de investigación	-11%	-	-3%

*Nota: fuentes diversas. Elaboración propia.*

Se logra observar que las mezclas de concreto con agregado reciclado tienen una tendencia a reducir la resistencia a la compresión, sin embargo, se puede encontrar estudios específicos como el caso de (Moreno, Manuel, Moctezuma, Alegría, & Moctezuma, 2015) que la resistencia para este tipo de concreto incremento considerablemente, brindando una panorámica diferente y alentadora para el reúso de este tipo de residuo.

Claro está que los resultados dependen de las condiciones iniciales en la que se establezca cada estudio como lo es la procedencia del residuo, la resistencia especificada

buscada, la relación agua cemento utilizada, la absorción de agua del material, su porosidad, entre muchos otros.

En síntesis, en términos técnicos es viable usar agregado grueso reciclado procedente de residuo de concreto de pavimento para uso no estructural con porcentajes de reemplazo en volumen de hasta un 50%, logrando alcanzar resistencias aproximadas a 19 MPa (2800 psi) o 20 MPa (2900 psi) si se aplica algún tipo de tratamiento a los agregados. Es preciso resaltar que la TME implementada aquí fue con el único fin de observar experimentalmente el comportamiento técnico del AGR utilizado, concluyendo que es útil considerar opciones de tratamiento previos a la utilización de áridos reciclados.

### **Evaluación Económica**

A partir de los resultados en la viabilidad técnica, la alternativa de concreto sostenible más viable es el AGR-50%, por esta razón la evaluación económica presenta los costos unitarios para fabricar esta alternativa de concreto y finalmente la comparación de estos resultados con el concreto convencional.

Tomando como guía el informe de (López Bastida et al., 2010), en la evaluación económica se estudian los costos de las materias primas y costos operativos que se generan, teniendo en cuenta la influencia y la variación al utilizar el agregado reciclado.

### **Análisis de costos.**

Las cantidades de materia prima y los costos de estos fueron calculados o estimados para fabricar 1 m<sup>3</sup> de concreto, para ello se tiene como base la dosificación resultante de la viabilidad técnica y algunas cotizaciones realizadas respectivamente.

La operación clave para convertir el residuo de concreto a agregado reciclado es la trituración por lo que se estimó previamente el costo aproximado de esta operación.

**Tabla 18.**

*Costos de la trituración del concreto reciclado.*

Descripción	Rendimiento	Costo
Trituradora Operador Gasolina	Aprox. 50 m <sup>3</sup> / jornal.	\$550.000
Transporte (Ida y vuelta)		\$310.000
<b>Total</b>		<b>\$860.000</b>

*Nota: información sacada de una cotización realizada a Agregados González en el mes de diciembre del 2018.*

De la anterior tabla se infiere que en una jornada de trituración de 8 horas se procesan en promedio 50 m<sup>3</sup> de residuo de concreto con un costo aproximadamente de \$860.000. A partir de ese precedente, se estima que para 1m<sup>3</sup> de agregado grueso reciclado el costo estará alrededor de \$ 17.200 COP.

Ahora bien, los precios de los demás materiales que conforman la fabricación del concreto se tomaron a partir de los resultados presentados por Construdata, en el estudio de costos promedio para la elaboración de concreto en Barranquilla que presentan en su página de manera privada:

**Tabla 19.***Precios promedio de cada material.*

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costos (COP)</b>
Agua	lt	\$4,5
Cemento Gris	Bolsa * 50Kg	\$19.000
Grava $\frac{3}{4}$ “(AGN)	m <sup>3</sup>	\$39.045
Arena (AFN)	m <sup>3</sup>	\$69.600
Escombros Reciclado (AGR)	m <sup>3</sup>	\$17.200

*Nota: elaboración propia, fuente: construdata.*

Los costos del cemento y del agua se obtuvieron a partir de un promedio de cotizaciones con los proveedores más comunes en la ciudad.

Con base en la dosificación definitiva con ajustes de la tabla 14 se calcularon las cantidades necesarias para fabricar un metro cúbico de concreto de la alternativa de reemplazo del 50%, en la tabla 20 se muestran las cantidades:

**Tabla 20.***Dosificación definitiva con ajustes.*

<b>Componente</b>	<b>AGR-50</b>
Agua	227,29 lt
Cemento	510,76 kg
Grueso	412,95 kg
Fino	817,05 kg
Grueso Reciclado	401,51 kg

*Nota: autoría propia.*

Las cantidades de la dosificación anterior fueron convertidas a unidades de volumen utilizando los resultados de la figura 41 de la viabilidad técnica.

A continuación, en la tabla 21 se muestra el factor que convierte masa a volumen para cada material y los resultados de las cantidades en volumen. El agua y el cemento cómo puede ser costeados a partir de cantidades masificadas permanecen de la misma forma.

**Tabla 21.**

*Relación masa y volumen de los agregados.*

<b>Componente</b>	<b>Masa Unitaria (kg/m3)</b>	<b>AGR-50</b>
Grueso	1346	0,306
Fino	1082	0,755
Grueso Reciclado	1050	0,382

*Nota: autoría propia.*

Una vez se tienen las cantidades, se estima la relación de los precios para cada material y se obtienen los costos directos para la fabricación del concreto con 50% de AGR los cuales se muestran en la tabla 22.

**Tabla 22.**

*Costos totales de materia prima.*

<b>Materiales Directos</b>	<b>AGR-50</b>
Agua	\$ 1.023
Cemento	\$ 199.500
Grueso	\$ 11.979
Fino	\$ 52.557
Grueso Reciclado	\$ 6.577
<b>Total</b>	<b>\$ 271.636</b>

*Nota: autoría propia.*

De la misma forma, Construdata presenta un promedio de los costos operativos (mano de obra y maquinaria) para la fabricación de  $1\text{m}^3$  de concreto en Barranquilla, a continuación en la tabla 23 se muestra la información:

**Tabla 23.**

*Costos operativos para fabricar  $1\text{m}^3$  de concreto.*

<b>Análisis</b>	<b>Unid.</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costos</b>
Hr. Ayudante de albañilería – prestaciones	Hh	2	\$ 14.206
Hr. Oficial albañilería – prestaciones	Hh	0,50	\$ 5.838
Mezcladora 1 bulto – Gasolina	días	0,06	\$ 2.088

*Nota: elaboración propia. Fuente: construdata.*

Para conocer los costos totales que se generan al fabricar  $1\text{m}^3$  del concreto sostenible con 50% de reemplazo de AGR se tienen en cuenta entonces los costos directos de materia prima y los costos operativos, como se presenta a continuación en la tabla 24:

**Tabla 24.**

*Costos finales para  $1\text{m}^3$  de concreto.*

	<b>AGR-50</b>
Costos de Materia Prima	\$271.636
Hr. Ayudante de albañilería – prestaciones	\$14.206
Hr. Oficial albañilería – prestaciones	\$5.838
Mezcladora 1 bulto – Gasolina	\$2.088
<b>Costo TOTAL</b>	<b>\$293.768</b>

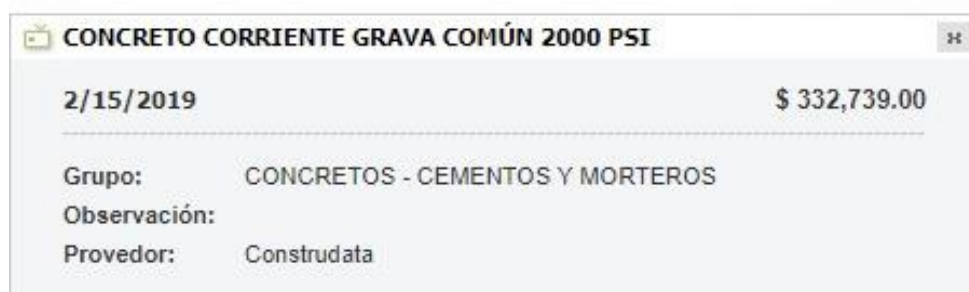
*Nota: elaboración propia.*

Se concluye entonces que el costo promedio de un metro cúbico de concreto sostenible es de **\$293.768**.

### Comparación con concreto convencional

Una vez identificados los costos de la alternativa en estudio, se compara con el precio promedio del concreto convencional.

Según Construdata como se muestra en la figura 49, en promedio un metro cúbico de concreto con grava corriente común diseñado para resistir 2000 psi tiene un valor de \$ **332.739**.

A screenshot of a software interface showing a price entry. At the top, there is a title bar with a small icon and the text "CONCRETO CORRIENTE GRAVA COMÚN 2000 PSI". Below this, the date "2/15/2019" is on the left and the price "\$ 332,739.00" is on the right. A horizontal line separates this header from the details below. The details include "Grupo: CONCRETOS - CEMENTOS Y MORTEROS", "Observación:" (which is empty), and "Proveedor: Construdata".

CONCRETO CORRIENTE GRAVA COMÚN 2000 PSI	
2/15/2019	\$ 332,739.00
Grupo: CONCRETOS - CEMENTOS Y MORTEROS	
Observación:	
Proveedor: Construdata	

Figura 47. Precio de 1m<sup>3</sup> de concreto 2000 psi en el mercado. Fuente: construdata.

En función de esta comparación puede decirse que el uso de la alternativa de concreto sostenible con AGR-50% en elementos no estructurales, reduce aproximadamente el 12% del costo del concreto convencional por metro cubico usado.

Lo cual para cantidades masificadas promete aún mayores ahorros. Sin olvidar que el reciclaje del residuo de concreto representa también una disminución en el impacto ambiental que estos desechos provocan, además de disminuir los gastos por la disposición de los mismo y propende el cumplimiento de la legislación local y nacional.

### **Conclusiones y recomendaciones**

Se concluye que la fabricación de concreto con agregado grueso reciclado procedente de los residuos de concreto de pavimento rígido en la ciudad de barranquilla es viable técnica y económicamente, por lo que se puede proceder a un estudio de factibilidad donde se profundicen el análisis del mercado y se realice cualquier ajuste pertinente.

De acuerdo con el estudio de mercado, las cantidades de residuos pétreos generados actualmente son potencialmente aprovechables para suplir la alternativa sostenible propuesta en este estudio. Además, del interés por parte de los generadores en cumplir lo establecido por la normatividad vigente.

En términos técnicos es viable para uso no estructural, con porcentajes de reemplazo en volumen de hasta un 50%, logrando alcanzar resistencias aproximadas de 19 MPa (2800 psi) o 20 MPa (2900 psi) si se aplica algún tipo de tratamiento a los agregados como lo planteado en el presente.

Conforme a la evaluación económica, el porcentaje de reutilización del AGR estudiando favorece a la reducción de los costos en la fabricación de esta alternativa de concreto, además de disminuir el consumo de agregados naturales y evita gastos por disposición de estos residuos, convirtiéndose esta opción llamativa en aspectos sostenibles.

Ahora bien, de manera general se logra concluir que:

Para un alto aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición, en especial los residuos de concreto, se necesita antes coordinar efectivamente la gestión de estos. En el casco urbano de Barranquilla se requieren más programas de comunicación, concientización y acompañamiento a los generadores de RCD para lograr un mayor sentido de pertenencia por parte de ellos, con el cumplimiento de la norma y el objetivo ambiental.



La logística idónea del transporte y disposición final de los RCD es casi nula puesto que en las zonas aledañas y en las localidades más vulnerables de la ciudad continúan las altas concentraciones de escombros vertidos a cielo abierto y de forma ilegal, como se observa a continuación:



*Figura 48.* Botadero encontrado en la circunvalar con la entrada de los robles. Fuente propia.

Pequeñas y medianas empresas ya están teniendo iniciativas de emprendimiento para la revalorización de los residuos, sin embargo, se necesita fortalecer la relación académica- gobierno- empresas privadas para lograr obtener resultados diferentes.

Durante el desarrollo de la investigación se corroboró que los residuos de concreto al ser materiales inertes son potencialmente reutilizables y revalorizables, estando bajo ciertas condiciones de manipulación in situ, la principal de ellas es evitar la combinación de estos con residuos sólidos y/o que entren en contacto con agentes contaminantes peligrosos, como es el combustible.

La muestra tomada del residuo de concreto de Barraquilla se comportó conforme a los resultados encontrados previamente en la literatura, siendo este más absorbente y húmedo que el AGN. Asimismo, se corroboró que las buenas prácticas de manipulación de los AGR como cuarteos y separaciones por tamaños nominales propician una mejor granulometría y masa unitaria de estos, lo anterior se comprueba en el capítulo 5 con la gradación del AGR con TME.

La TME arroja buenos resultados en el análisis técnico disminuyendo la porosidad y el número de partículas indeseables (finos) del AGR. Se resalta que el impacto y la fricción entre los mismos elementos granulares en la operación de pulido y posteriormente en el lavado a presión con agua, logra retirar gran cantidad de pasta de cemento comúnmente encontrada en los agregados reciclados.

En este orden de ideas, la obtención del AGR es sencilla y económica, a partir de los residuos que se tengan puede obtenerse la trituradora en alquiler o como maquinaria pasiva con inversión a corto plazo puesto que el AGR es 42% más económico que el AGN, es decir, es realmente competitivo.

Se recomienda que la trituración de los residuos se realice de forma industrial, es decir, con máquinas especiales destinadas a esta función, para velar por las características mecánicas propias del residuo sin permitir alguna afectación interna.

Comparando la gradación del AGR con y sin TME, se puede evidenciar que el contenido de finos es muy alto en el AGR no tratado, haciendo que su granulometría no cumpla con la normativa y mostrando un amplio campo de posibilidades en la investigación de técnicas más desarrolladas con el fin de buscar tratamientos para el mejoramiento de los agregados reciclados.

Para los próximos investigadores que quieran incursionar en esta área de materiales, específicamente, en el estudio del concreto, se les recomienda asesorarse técnicamente con personas que estén relacionadas con las buenas prácticas de la fabricación de mezclas de concreto.

Para investigaciones experimentales se recomienda obtener la cantidad de datos suficientes para así establecer información más representativa a través de los análisis estadísticos que se requieran.

### Referencias

- Acciona sa. (2017). No Title. Retrieved from <https://www.acciona.com/es/>
- Agrega Sotelo, G. A., & Moncada Moreno, G. L. (2015). *Viabilidad en la elaboración de prefabricados en concreto usando agregados gruesos reciclados*. Universidad Católica de Colombia.
- Alcaldía de Barranquilla. (2015). DISTRITO ESPECIAL , INDUSTRIAL Y PORTUARIO DE BARRANQUILLA PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS – PGIRS Oficina de Desarrollo Económico y Social Oficina de Hábitat Barranquilla , Diciembre 20 de 2015.
- Argos. (2018). Cemento gris uso general. Retrieved from <https://colombia.argos.co/Portals/Colombia/Contenido/Conoce-nuestros-productos/Cemento/Uso-general/Cemento-Gris/Argos-FT-CementoGris-UsoGeneral.pdf>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). NSR-10 Título C - Concreto Estructural. Bogotá.
- Barranquilla Verde. Resolución 1482-2017 (2017).
- Bedoya Montoya, C. M., & Dzul López, L. A. (2015). Minería a la inversa: un enfoque para la viabilidad de proyectos e iniciativas de construcción sostenible.
- Bermejo Urzola, G. A. (2016). Lineamientos para la Gestión Ambiental de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) Generados en Barranquilla D.E.I.P., 1–142.
- Carcamo, G. (2008). Gestión Interna De Los Residuos Sólidos Producidos En Las Obras De Construcción De Tipo Urbanístico Utilizando Como Herramienta Tecnológica De Ayuda Los Sistemas De Información Geográfica. *Zhurnal Eksperimental'noi I Teoreticheskoi Fiziki*, 8,9,17,18,. Retrieved from

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0>

- Chávez Porras, Á., Palacio León, Ó., & Guarín Cortés, N. L. (2013). UNIDAD LOGÍSTICA DE RECUPERACIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN: ESTUDIO DE CASO BOGOTÁ D.C TT - LOGISTIC UNIT TO THE RECOVERY OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE: Study Case BOGOTÁ D.C. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 23(2), 95–118. Retrieved from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-81702013000200006&lang=pt%5Cnhttp://www.scielo.org.co/pdf/cein/v23n2/v23n2a06.pdf](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702013000200006&lang=pt%5Cnhttp://www.scielo.org.co/pdf/cein/v23n2/v23n2a06.pdf)
- CRA, C. A. R. (2019). No Title. Retrieved from <http://www.crautonomia.gov.co/>
- European Commission. (2011). |A project under the Framework contract SERVICE CONTRACT ON MANAGEMENT OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION, 33(0).
- Gámez García, D. C., Saldaña Márquez, H., Gómez Soberón, J. M., & Corral Higuera, R. (2017). Estudio de factibilidad y caracterización de áridos para hormigón estructural, 35, 283–304.
- Giraldo, O. (1987). *Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón*. Universidad Nacional sede Medellín, Medellín.
- Gutiérrez Moreno, J. M., Mungaray Moctezuma, A., & Hallack Alegría, M. (2015). Reuse of Hydraulic Concrete Waste as a New Material in Construction Procedures: a Sustainable Alternative in Northwest Mexico. *Revista de La Construcción*, 14(2), 51–57. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2015000200007>
- Hayles, M., Sanchez, L. F. M., & Noël, M. (2018). Eco-efficient low cement recycled concrete aggregate mixtures for structural applications. *Construction and Building*

*Materials*, 169, 724–732. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.127>

Jiménez, C., Aponte, D., Vázquez, E., Barra, M., & Valls, S. (2013). Diseño de mezclas de hormigón reciclado mediante el método Volumen de Mortero Equivalente (EMV): Validación bajo el contexto español y su adaptación al método de diseño de Bolomey. *Materiales de Construcción*, 63(311), 341–360.

<https://doi.org/10.3989/mc.2012.01112>

Leonardo Solarte Pazos. (2001). Manual resumido de Gestión de Proyectos. Cali.

López Bastida, J., Oliva, J., Antoñanzas, F., García-Altés, A., Gisbert, R., Mar, J., & Puig-Junoy, J. (2010). Propuesta de guía para la evaluación económica aplicada a las tecnologías sanitarias. *Gaceta Sanitaria*, 24(2), 154–170.

<https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2009.07.011>

Mahpour, A. (2018). Resources , Conservation & Recycling Prioritizing barriers to adopt circular economy in construction and demolition waste management. *Resources, Conservation & Recycling*, 134(November 2017), 216–227.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.026>

Martín Morales, M., Zamorano, M., Ruiz Moyano, A., & Valverde Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*, 25(2), 742–748.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.012>

Mejía, E., Giraldo, J., & Martínez, L. (2013). Residuos de Construcción y Demolición: Revisión Sobre su Composición, Impactos y Gestión. *Cintex*, 18, 105–130.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, C. (2017). RESOLUCION-472-DE-2017.pdf.

- Moreno, G., Manuel, J., Moctezuma, M., Alegría, H., & Moctezuma, A. M. (2015). Reuse of Hydraulic Concrete Waste as a New Material in Construction Procedures : a Sustainable Alternative in Northwest Mexico.
- Organización de Naciones Unidas. (2015). Agenda 2030 para el desarrollo sostenible. Retrieved from <https://www.cepal.org/es/temas/desarrollo-sostenible/acerca-desarrollo-sostenible>
- Osorio, S. (2015). *Aprovechamiento y revalorización de residuos de la construcción y demolición generados por un evento adverso para la construcción de obras civiles sostenibles*. Universidad Católica de Manizales.
- Pacheco, C., Fuentes, L., Sánchez, É., & Rondón, H. (2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de barranquilla desde su modelo de gestión. *Construction Demolition Waste (CDW),a Perspective of Achievement for Thecity of Barranquilla since Itsmanagement Model.*, 35(2), 533–555. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=124714208&lang=es&site=ehost-live>
- Palacio León, Oscar; Chávez Porras, Álvaro; Velásquez Castiblanco, Y. L. (2017). Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados. *Tecnura*, 21, 96–106. <https://doi.org/10.14483/22487638.8195>
- Sánchez De Guzmán, D. (1996). *Tecnología del concreto y del mortero*. (P. U. Javeriana & B. E. Ltda., Eds.) (Tercera). Bogotá.
- Secretaría Distrital de Ambiente, B. D. C. (2015). Guía para la elaboración del Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra.



### **Apéndice**

Anexo 1. Formato encuestas.

Anexo 2. Registro fotográfico del mapeo realizado.

Anexo 3. Registro fotográfico de las probetas ensayadas.